



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ**

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

**HODNOCENÍ VLASTNOSTÍ BEZBARVÝCH A  
PIGMENTOVANÝCH ASFALTOVÝCH POJIV**

EVALUATION OF PROPERTIES OF CLEAR AND PIGMENTED ASPHALT BINDERS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE: Monika Kamanová**

AUTHOR

**VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. ONDŘEJ DAŠEK, Ph.D.**

SUPERVISOR

**BRNO 2021**



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Monika Kamanová
Název	Hodnocení vlastností bezbarvých a pigmentovaných asfaltových pojiv
Vedoucí práce	Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2020
Datum odevzdání	28. 5. 2021

V Brně dne 30. 11. 2020

---

doc. Dr. Ing. Michal Varaus  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Předané vzorky asfaltových pojiv

Normy ČSN 65 7204, ČSN 65 7222-1, ČSN EN 1426, ČSN EN 1427, ČSN EN 14770, ČSN EN 14771, ČSN EN 12593, ČSN EN 12607-1, ČSN EN 14769

Literatura z internetu

Zásady pro vypracování

Cílem bakalářské práce bude porovnat vybrané vlastnosti bezbarvého asfaltového pojiva s běžně používaným srovnávacím silničním asfaltem. Vlastnosti pojiv budou srovnány pomocí vhodných laboratorních zkoušek včetně popisu vlivu simulace stárnutí na změnu vlastností těchto pojiv.

Struktura bakalářské práce

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

---

Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce porovnává vybrané vlastnosti bezbarvého asfaltového pojiva s pigmentovaným (obarveným) asfaltovým pojivem. V teoretické části jsou vysvětleny vlastnosti asfaltových pojiv a zlepšení jejich vlastností po přidání přísad a příměsí. V druhé části jsou popsány metody a poté výsledky jednotlivých zkoušek. K porovnání vlastností pojiv byly provedeny empirické zkoušky (penetrace jehlou, bod měknutí, bod lámavosti) a funkční zkoušky za pomoci dynamického smykového a průhybového trámečkového reometru (BBR). V závěru této části je popsáno podrobněji laboratorní stárnutí asfaltových pojiv metodou RTFOT a metodou RTFOT + PAV.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

asfaltové pojivo, pigment, penetrace jehlou, bod měknutí, bod lámavosti komplexní smykový modul, fázový úhel, BBR, RTFOT, PAV

## **ABSTRACT**

The Bachelor thesis subject is comparison of the chosen parameters of clear asphalt binder with pigmented asphalt binder. The theoretical part explains parameters of asphalt binders and improving their properties after using additives. The second part is explaining methods and test results. The empirical tests (needle penetration, softening point, breaking point) and performance tests in dynamic shear rheometer and bending beam rheometer are used for comparison of binders properties. In the conclusion the laboratory aging of asphalt binders is described by RTFOT and RTFOT + PAV method.

## **KEYWORDS**

asphalt binder, pigment, needle penetration, softening point, breaking point, complex shear modulus, phase angle, BBR, RTFOT, PAV

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KAMANOVÁ, Monika. *Hodnocení vlastností bezbarvých a pigmentovaných asfaltových pojiv*. Brno, 2021. 68 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

# **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY**

## **ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Hodnocení vlastností bezbarvých a pigmentovaných asfaltových pojiv* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

Brno, 10. 5. 2021

---

Monika Kamanová  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Hlavní poděkování patří vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Ondřeji Daškovi, Ph.D. za cenné rady a věnovaný čas. Dále děkuji všem zaměstnancům laboratoře ústavu pozemních komunikací, především Pavlu Strakovi a Ing. Jiřímu Sachrovi za pomoc při provádění zkoušek v laboratoři.

# OBSAH

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>2. REŠERŠE LITERATURY .....</b>	<b>10</b>
2.1 CHARAKTERISTIKA ASFALTU .....	10
2.2 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ ASFALTŮ .....	12
2.3 VÝROBA ASFALTŮ .....	14
2.4 MODIFIKAČNÍ PŘÍSADY .....	16
2.5 ASFALTOVÉ SMĚSI S PŘÍSADOU KROMATIS® .....	18
<b>3. CÍLE PRÁCE.....</b>	<b>21</b>
<b>4. POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY .....</b>	<b>22</b>
4.1 STANOVENÍ PENETRACE JEHLOU .....	22
4.2 STANOVENÍ BODU MĚKNUTÍ – METODA KROUŽEK A KULIČKA.....	25
4.3 STANOVENÍ KOMPLEXNÍHO SMYKOVÉHO MODULU A FÁZOVÉHO ÚHLU V DSR .....	27
4.4 STANOVENÍ BODU LÁMAVOSTI PODLE FRAASSE .....	29
4.5 STANOVENÍ ODOLNOSTI PROTI STÁRNUTÍ VLIVEM TEPLA A VZDUCHU – METODA RTFOT ..	32
4.6 URYCHLENÉ DLOUHODOBÉ STÁRNUTÍ V TLAKOVÉ NÁDOBĚ PAV .....	33
4.7 STANOVENÍ MODULU TUHOSTI ZA OHYBU POMOCÍ PRŮHYBOVÉHO TRÁMEČKOVÉHO REOMETRU BBR.....	35
<b>5. POUŽITÉ MATERIÁLY.....</b>	<b>39</b>
<b>6. VÝSLEDKY ZKOUŠEK.....</b>	<b>40</b>
6.1 STANOVENÍ PENETRACE JEHLOU .....	40
6.2 STANOVENÍ BODU MĚKNUTÍ – METODA KROUŽEK A KULIČKA.....	42
6.3 STANOVENÍ KOMPLEXNÍHO SMYKOVÉHO MODULU A FÁZOVÉHO ÚHLU V DSR .....	44
6.4 STANOVENÍ BODU LÁMAVOSTI PODLE FRAASSE .....	54
6.5 STANOVENÍ MODULU TUHOSTI ZA OHYBU POMOCÍ PRŮHYBOVÉHO TRÁMEČKOVÉHO REOMETRU BBR.....	54
<b>7. ZÁVĚR.....</b>	<b>58</b>
<b>8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ .....</b>	<b>61</b>
<b>9. SEZNAMY.....</b>	<b>64</b>
9.1 SEZNAM OBRAZKŮ .....	64
9.2 SEZNAM TABULEK .....	66
9.3 SEZNAM GRAFŮ.....	67



## 1. ÚVOD

V poslední době čím dál rychleji narůstá intenzita dopravy a tím se snižuje kvalita pozemních komunikací. Velký důraz je tak kladen na asfaltové pojivo, které je společně s kamenivem nedílnou součástí asfaltových směsí. Asfaltové pojivo mění své vlastnosti po dobu své životnosti velmi rychle. Hlavním důvodem je opakované vystavování proměnlivým nepříznivým teplotám, zejména nadměrnému zahřívání center měst. Z důvodu proměnlivých vlivů je tedy velmi důležité vhodně zvolit asfaltová pojiva. Na ně jsou tak kladeny stále větší požadavky na bezpečnost a spolehlivost. Dnešním velkým trendem, který ovlivňuje výběr materiálu, je snaha co nejméně zatěžovat životní prostředí. Dalším aspektem vstupujícím do návrhu vozovky je ekonomika, kde je kladen důraz na minimalizaci cen za výrobu a údržbu.

Kromatis® je bezbarvý syntetický asfalt. V obalovnách je obarvován přidáním vybraného pigmentu a zároveň smíchán s kamenivem. Dle výrobce světlé odstíny šedé a žluté snižují akumulaci tepla ze slunečního záření, v tunelech snižují potřebu umělého osvětlení. Výrazné barvy zvyšují pasivní bezpečnost, napomáhají řidiči lepe vnímat společný dopravní prostor, a tak zlepšují jeho orientaci, zvýrazňují kritická místa jako jsou přechody pro chodce, křížení cyklostezek se silnicí, kruhové objezdy apod. Snižují z dlouhodobého hlediska finanční náklady na údržbu vodorovného značení. V neposlední řadě vzhled vozovky působí velmi kladně z hlediska estetického. Kromě snížení tepelné zátěže měst a lepšího estetického vzhledu přináší také další výhodu, při snížené teplotě povrchu až 150 °C, se snižují náklady a má pozitivní vliv na pracovní podmínky obsluhy.

V této bakalářské práci budou porovnány vlastnosti následujících tří pojiv třídy 50/70:

- standardní silniční asfalt
- bezbarvé syntetické pojivo
- syntetické pigmentované pojivo

## 2. REŠERŠE LITERATURY

### 2.1 Charakteristika asfaltu

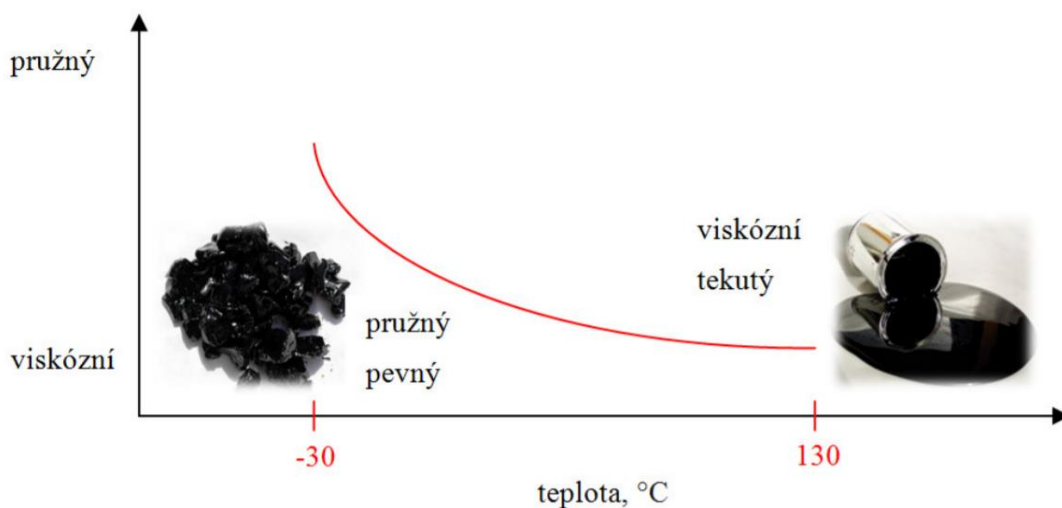
Název asfalt pochází ze starořečtiny, v anglické literatuře nazývaný bitumen (původ hebrejský). Z chemického hlediska se jedná o koloidní směs vysoce molekulárních uhlovodíků. Chemické složení je složité popsat, při rozboru nalezneme 300 až 2000 sloučenin. Ze zprávy výzkumu SHRP (Strategic Highway Research: Special Report) jsou hlavními složkami asfaltu uhlík (80-88 % hm.) a vodík (8–11 % hm.). Kromě těchto prvků obsahuje také síru, kyslík, dusík a organicky vázané kovy, zejména vanad a nikl. [1, 2, 3]



*Obrázek 1: Vzorek standardního silničního asfaltového pojiva 50/70*

Proto rozdělení zjednodušíme na pevné částice asfaltény, které mají zastoupení přibližně 5 až 25 % a na tekuté složky označované maltény (pryskyřice, olej). Tyto složky zkoumá analýza SARA pro zastoupené frakce Saturate (saturáty), Aromatic (aromáty), Resin (pryskyřice), Asphaltene (asfaltény). [2, 3]

Chování asfaltového pojiva je závislé na teplotě, proto musíme vždy udávat teplotní údaje do výsledku zkoušek. Z hlediska fyziky můžeme asfalt označovat jako amorfní, prakticky netěkavý, viskoelastický materiál. Za nižších teplot se jedná o pružnou, pevnou látku. Na druhé straně s rostoucí teplotou měkne a stává se kapalinou charakterizovanou svou viskozitou. Visko-elastické vlastnosti asfaltu jsou znázorněné na obrázku 2. [1, 2, 3]



Obrázek 2: Visko-elastické vlastnosti asfaltu [5]

Důležité je zdůraznit chování asfaltových směsí v závislosti na rychlosti zatížení. Velké deformace vznikají při nízkých rychlostech nebo stání vozidel, a naopak při velkých rychlostech se asfaltové směsi deformují jen minimálně. Obecně podle délky zatížení a viskozity dochází k různé velikosti deformace. [1]



Obrázek 3: Vyjeté koleje v autobusové zastávce [6]

Asfaltové pojivo se ve vodě téměř nerozpouští, neobtná, přijímá jen na povrchu stopové množství vody a díky těmto voděodolným vlastnostem jej můžeme využívat jako izolační materiál [2]

Kvůli organickému původu asfaltu nesmíme opomíjet vliv oxidace neboli tvrdnutí a stárnutí asfaltu. Zoxidováním jeho struktura tvrdne a stává se křehčí. Oxidační proces můžeme urychlit pomocí vysokých teplot při míchání asfaltové směsi na obalovně. Podobně na asfalt působí ultrafialové záření. [1, 2]

## 2.2 Základní rozdělení asfaltů

Pokud chceme dobře určit vlastnosti asfaltu je potřeba znát jeho původ. V zásadě rozdělujeme asfalty na přírodní a ropné, přičemž přírodních asfaltů je velmi málo. Čistý asfalt získáme zahřátím na 160 °C, přes síta následně prolijeme, abychom zachytili hrubé nečistoty a organické zbytky. V současnosti se vyskytuje buď ve formě asfaltových jezer, nebo jako výron naftenových rop, které se po okysličení změny v asfalt. Největší asfaltové jezero na světě se nachází na karibském ostrově Trinidad (Lake Pitch). [1, 2, 7]



*Obrázek 4: Pitch Lake, Trinidad [8]*

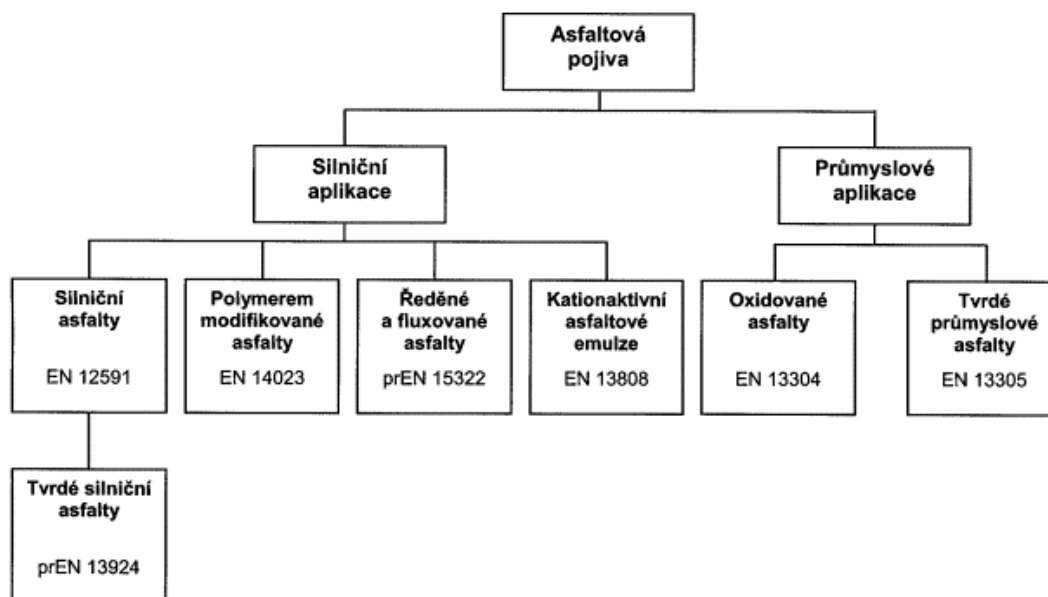
V Evropě se ojediněle dováží přírodní těžený asfalt z Albánie, z oblasti Selenica. Patří mezi horninové asfalty, vyskytuje se jako velké čocky v píscích a štěrcích nebo vytváří vrstvy v pískovci či slínovém vápenci. Je charakterizován svým nedráždivým aromatickým pachem, je těžko tavitelný a má vysokou konzistenci. Dodáván je jako volně ložený nebo pytlovaný. [14]



Asfaltová pojiva, která jsou vyrobená atmosférickou destilací surové ropy, následnou vakuovou destilací destilačního zbytku a dalšími úpravami, jsou nejrozšířenějším pojivem netuhých vozovek. Dle chemického hlediska rozdělujeme ropu na tři základní druhy asfaltické, poloasfaltické a neasfaltické (parafínické). Někdy je třídění ropy doplněno dle obsahu parafínu na parafínické (obsah parafínu >2 %) nebo neparafínické (obsah parafínu 1 %) [1, 9, 10, 14]

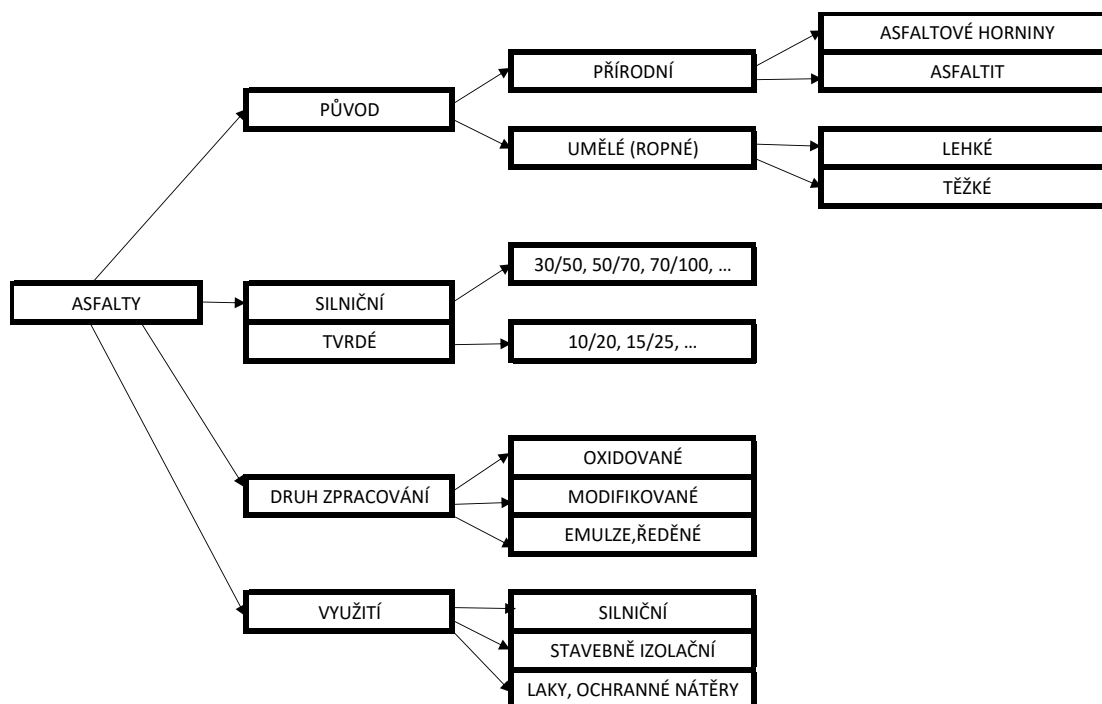


Obrázek 5: Ukázka ropné rafinerie TOTAL ČESKÁ REPUBLIKA s.r.o. [11]



Obrázek 6: Rozdělení asfaltových pojiv dle ČSN EN 14023 [12]

Na obrázku 6. je znázorněno rozdělení asfaltových pojiv dle ČSN EN 14023 Asfalty a asfaltová pojiva – Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty 2010



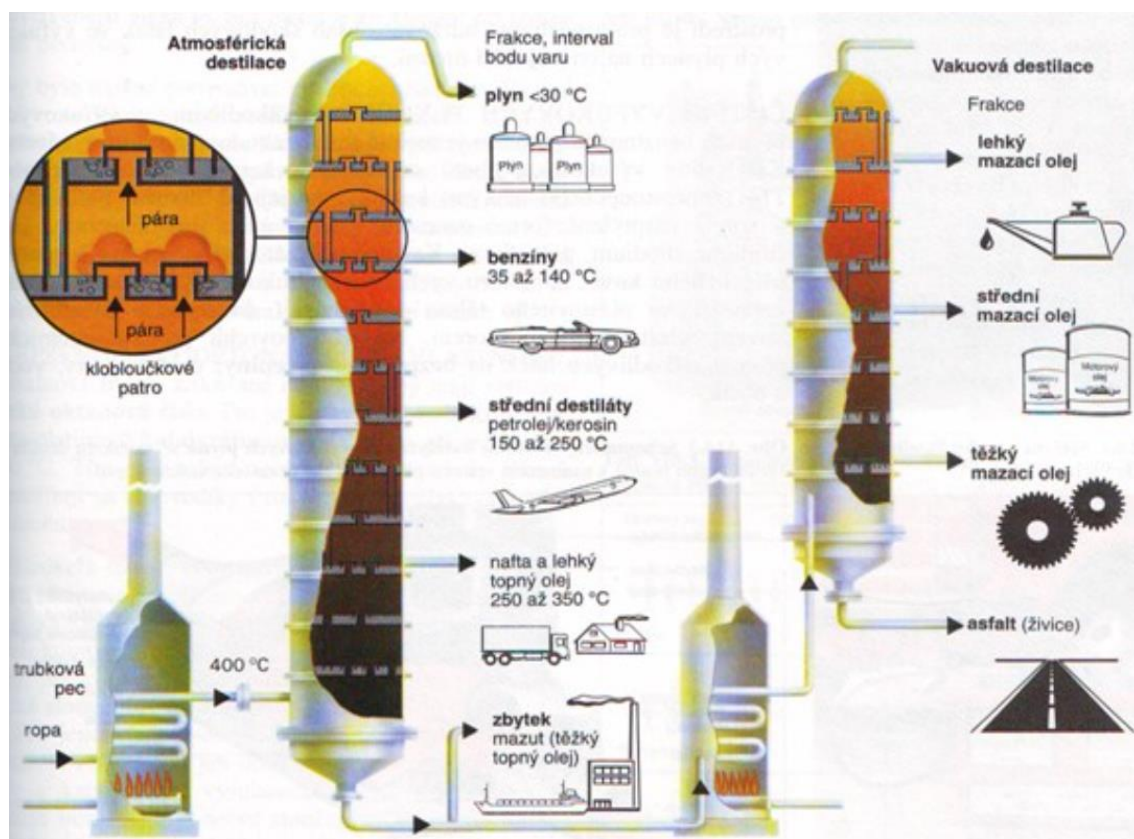
Obrázek 7: Základní dělení asfaltů

Na obrázku 7. schéma pro lepší představu dělení asfaltů podle vlastností, původu, způsobu výroby a následného využití v praxi.

## 2.3 Výroba asfaltů

Asfalt se získává hlavně frakční destilací z ropy (tedy oddělení jednotlivých složek podle teploty varu). Destilace je třístupňová a probíhá v trubkových pecích. Ropa teče soustavou trubek, které jsou ohřívány buď přímo plamenem, nebo prouděním horkých spalin. Poté dochází k nástřiku do atmosférické destilační kolony, což jsou válcovitá plechová tělesa rozdělena přepážkami na několik pater. V koloně je přítomna jak plynná, tak kapalná fáze. Kapalná fáze je přiváděna na vrch kolony a stéká po patrech dolů. Plynná se tvoří ihned po nástřiku z trubkové pece a probublává jednotlivými patry. [1, 10]

V atmosférické koloně se oddestiluje nafta, olej, petrolej, kerosin, benzín a destilační zbytek mazut. Mazut se dále destiluje ve vakuových kolonách. Z destilace za podtlaku získáme tři olejové frakce s lišící se viskozitou a posledním produktem je asfalt. [1, 10]

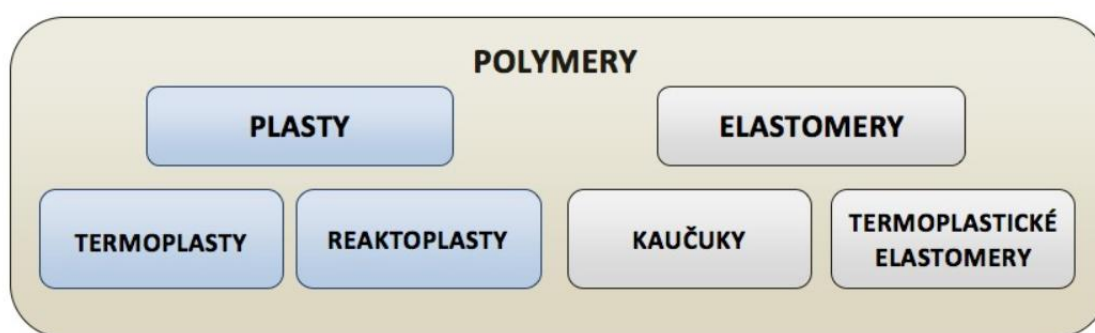


Obrázek 8: Grafické znázornění frakční destilace [13]

Získaný asfalt můžeme dále zpracovávat kontinuální oxidací. Pro použití v silničním stavitelství rozlišujeme asfalty na destilační (získané přímo po destilaci), polofoukané (vytvořené z destilačních asfaltů umělým stárnutím, oxidací vakuového zbytku), foukané (vytvořené z destilačních asfaltů umělým stárnutím, oxidací k získání vysoce viskózních asfaltů používaných v izolacích proti vodě a vlhkosti) a modifikované (upravené přidávkou přísad, ty se využívají pro vysoce namáhané asfaltové směsi nebo pro závlaky). [1]

## 2.4 Modifikační přísady

Modifikační přísady přidáváme do asfaltových pojiv hlavně kvůli zlepšení reologických vlastností. Přidáním přísad k základnímu asfaltu můžeme snížit teplotní citlivost a jeho křehkost, zvýšit bod měknutí, navýšit kohezi, soudržnost, přilnavost ke kamenivu, snížit stárnutí asfaltu a zvýšit odolnost proti vzniku trvalých deformací. Mezi nejznámější modifikátory patří polymer, ale dále také celulózová vlákna. Z ekologického hlediska lze dnes pozorovat snahu o větší využití starých pneumatik, odpad z PET, z PVC, nebo z použitých balících pásek. [1, 14, 16]



Obrázek 9: Základní rozdělení polymerů [15]

Polymery mají makromolekulární řetězce uspořádané v rovině (lineární, rozvětvené) nebo v prostoru (síťové struktury). V evropské normě EN 14023 se uvádějí zkratkou PmB (Polymer modified Bitumen). Za normálních teplot se polymery nacházejí ve čtyřech fázových stavech (sklovitém, kaučukovitém, plastickém nebo krystalickém). Polymery obecně rozlišujeme na elastomery a plasty. Plasty dále dělíme na termoplasty a reaktoplasty. U elastomerů jsou typickým představitelem kaučuky, ze kterých se vyrábí například pryž. Základní rozdělení polymerů je znázorněno na obrázku 9. [1, 15, 17, 18]



Plasty jsou většinou za běžných podmínek tvrdé, často i křehké. Další dělení pak záleží na tom, zda se plasty vrátí po zchlazení do tuhého stavu a tento děj je opakovatelný. Pokud se tak děje, hovoříme o termoplastech, oproti tomu, při nevratné změně, hovoříme o reaktoplastech. Změna je u těchto materiálu nevratná, jelikož dojde ke změně chemické struktury. Na rozdíl od plastů elastomery jsou vysoce pružné (elastické) materiály s nízkou tuhostí, které můžeme za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení. [15]



*Obrázek 10: Plast (vlevo), elastomer (vpravo) [15]*

## 2.5 Asfaltové směsi s přísadou Kromatis®

Řada KROMATIS® je bezbarvý syntetický asfalt určený pro barevné úpravy pozemních komunikací. Maximální teplota asfaltu se může při extrémně vysokých teplotách vyšplhat až nad 60 °C. Teplo slunečního záření absorbované na povrchu městské zástavby a komunikací zvyšuje teplotu vzduchu, dochází k přehřívání a snižuje se kvalita života obyvatel. Když použijeme světlé odstíny povrchových úprav, dojde ke snížení absorpci tepla na povrchu městských silnic.



Obrázek 13: Odstín červené [22]

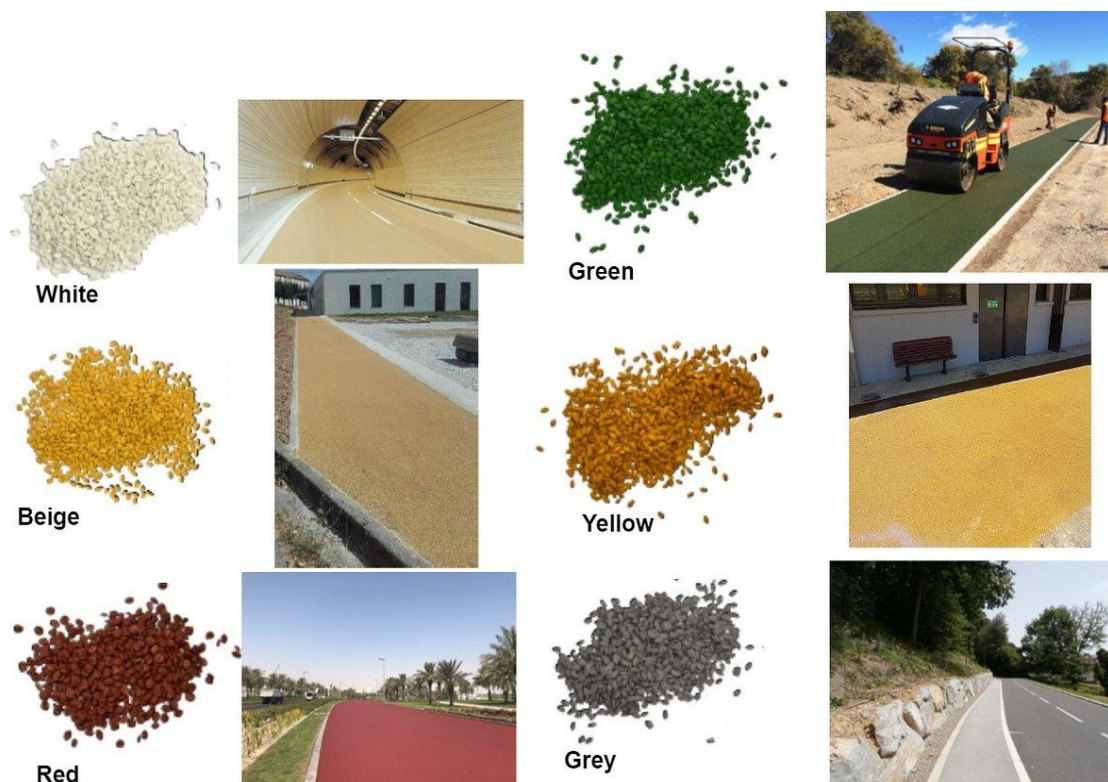


Obrázek 11: Odstín žluté [19]



Obrázek 12: Odstín zelené [19]

Kromě snížení tepelné zátěže měst a lepšího estetického vzhledu přináší také další benefity. Jeden z nich je pasivní bezpečnost, neboť výrazná barva zklidňuje dopravu a zvyšuje viditelnost kritických míst. Použití světlých odstínů pomáhá nejen ke snížení absorpce tepla na povrchu, ale také na vozovky v tunelech, kde se zvýší odrazivost světla od povrchu, čímž se sníží náklady na osvětlení. [19, 20, 21]



*Obrázek 14: Příklady použití pigmentů [23]*

Vyrábějí se v následujících variantách: KROMATIS 20/30, 35/50, 50/70, 70/100, 160/220 a M5 (INDOOR). Tyto asfalty mají shodné kvalitativní parametry jako běžné ropné (černé) silniční asfalty. Modifikací polymerem získává bezbarvý asfalt lepší reologické vlastnosti než klasický silniční asfalt, zlepšené adhezní vlastnosti mezi pojivem a kamenivem, vynikající mechanickou odolnost proti vzniku deformací a trhlin a dlouhou životnost. [20]



Bezbarvý syntetický asfalt Kromatis® je dodáván do obaloven, kde je obarvován přidáním vybraného pigmentu a zároveň je v mísícím zařízení obalovny, tzv. míchačce, smíchán s kamenivem. Mezi nejběžněji používané pigmenty pro barvení asfaltu se používají oxidy kovů, jako jsou oxid železitý pro odstíny červené barvy, oxid chromitý pro odstíny zelené a oxid titaničitý pro odstíny žluté. Obarvené pojivo se vyrobí smísením syntetického pojiva Kromatis® s pigmentem v poměru 3:1 v závislosti na požadovaném odstínu. Mísení asfaltové směsi a následná pokládka podléhá přísné technologické disciplíně, aby nedošlo ke znehodnocení barevného asfaltu zbytky klasického černého asfaltu. Výsledná asfaltová směs se aplikuje při snížené teplotě pokládky až 150 °C, což snižuje náklady na pokládku a má pozitivní vliv na pracovní podmínky obsluhy. Samotné bezbarvé asfaltové pojivo má světle okrovou, medovitou barvu. Kromatis® je dodáván pro velké objemy v automobilových cisternách, do 190 kg v sudech a do 0,5 kg v plastových pytlících, které jsou rozpustné spolu s pojivem a jsou tak bezodpadové.[19]



*Obrázek 15: Barevné varianty pigmentů [20]*

### 3. CÍLE PRÁCE

Cílem této bakalářské práce bude porovnat vlastnosti tří asfaltových pojiv. Zadáání vzniklo na základě spolupráce s firmou TOTAL ČESKÁ REPUBLIKA s.r.o., která také dodala bezbarvé syntetické pojivo třídy 50/70 a syntetické pigmentované pojivo třídy 50/70. Vlastnosti těchto pojiv byly srovnány se standardním silničním asfaltem třídy 50/70. Veškeré zkoušky budou provedeny dle platných norem uvedených v části o použitých metodách níže v textu.

V laboratoři se provedou tyto zkoušky ve třech stupních zestárnutí pojiv:

➤ Nezestárlá pojiva:

- Penetrace jehlou podle ČSN EN 1426
- Bod měknutí podle ČSN EN 1427
- Komplexní smykový modul  $G^*$  a fázový úhel  $\delta$  při teplotě 60 °C z oscilačních zkoušek v DSR podle ČSN EN 14770
- Bod lámavosti podle Fraasse podle ČSN EN 12593

➤ Pojiva zestárlá metodou RTFOT podle ČSN EN 12607-1:

- Penetrace jehlou podle ČSN EN 1426
- Bod měknutí podle ČSN EN 1427
- Komplexní smykový modul  $G^*$  a fázový úhel  $\delta$  při teplotě 60 °C z oscilačních zkoušek v DSR podle ČSN EN 14770

➤ Pojiva zestárlá metodou RTFOT + PAV podle ČSN EN 14769:

- Penetrace jehlou podle ČSN EN 1426
- Bod měknutí podle ČSN EN 1427
- Komplexní smykový modul  $G^*$  a fázový úhel  $\delta$  při teplotě 60 °C z oscilačních zkoušek v DSR podle ČSN EN 14770
- Kritická teplota z BBR (Bending Beam Rheometer) podle ČSN EN 14771

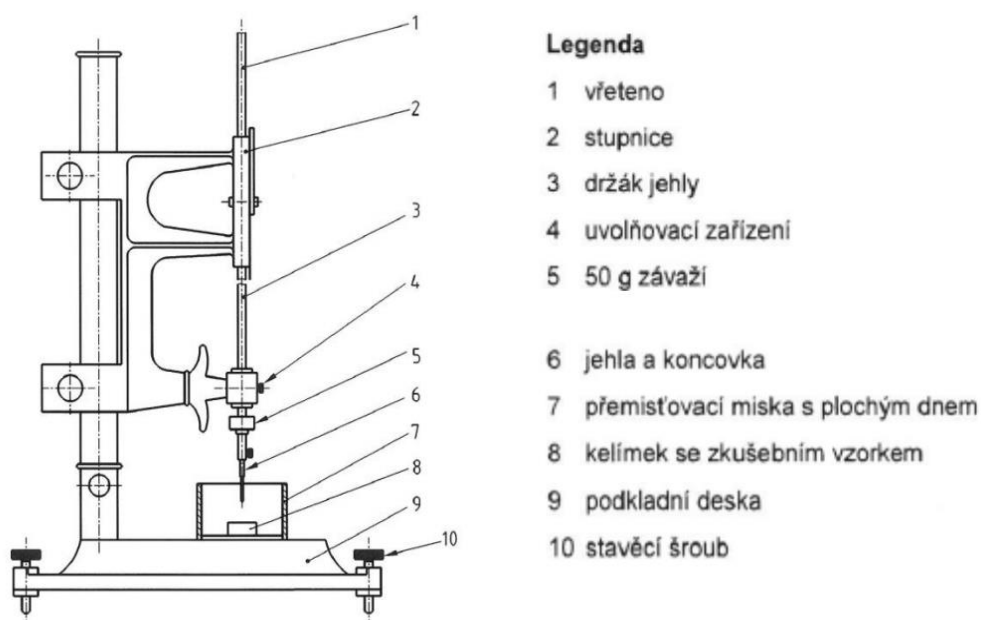
## 4. POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY

V bakalářské práci budou použity zkoušky konvenční (empirické) jako jsou penetrace, bod měknutí, bod lámavosti podle Fraasse a zkoušky funkční, mezi které patří stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu za pomoci dynamického smykového reometru DSR a stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru BBR.

### 4.1 Stanovení penetrace jehlou

Zkouška je definována v normě ČSN EN 1426: Asfalty a asphaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou.

Konzistence vzorku materiálu je vyjádřena jako hloubka proniknutí jehly za stanovených podmínek. Tyto podmínky jsou vyjádřeny teplotou, zatížením a časem, při kterém působí na jehlu zatížení. Pro pojiva o penetraci do 330 x 0,1 mm je teplota stanovena na 25 °C, zatěžovací hmotnost 100 g a čas 5 s. Hodnoty penetrace jsou vyjádřeny v penetračních jednotkách (1 p.j. = 0,1 mm).



Obrázek 16: Příklad penetrometru [24]

Pomůcky pro stanovení penetrace jsou penetrometr, penetrační jehla, nádoba na zkušební vzorek, vodní lázeň, přenosná miska potřebná pro zkoušku vykonávanou mimo vodní lázeň, zařízení na měření času a teploměr.



*Obrázek 17: Zkušební kelímky s pojivem*



*Obrázek 18: Temperování zkušebních kelímků s pojivem*

Do čistého kelímku připravíme analytický vzorek pojiva, a to v takovém množství, aby výška hladiny byla alespoň o 10 mm větší, než je předpokládaná hloubka vniknutí jehly. Vzorek se nechá chladit na teplotu mezi 15 °C až 30 °C. Před měřením se vzorek nechá alespoň 60 až 90 minut temperovat v lázni s řízenou konstantní teplotou 25 °C. Kelímek se po temperování umístí do přenosné misky s vodou z lázně tak, aby byl kelímek úplně ponořen. Přenosná miska se položí na podstavec připraveného penetrometru. Jehla se sníží k povrchu vzorku tak, že se dotýká svého odraženého obrazu, tato

pozice se určí jako nulová. Poté se uvolní jehla přitížená aplikovaným zatížením 100 g, aby vnikala do vzorku po dobu 5 s. Následně se na stupnici odečte hodnota penetrace. Provedou se minimálně tři platná stanovení třemi různými jehlami. Místa penetrování musí být nejméně 10 mm od okraje nádoby se vzorkem a 10 mm od sebe navzájem. Maximální rozdíl mezi extrémními hodnotami je uveden v tabulce 1.

Penetrace [0,1 mm]	do 49	50 až 149	150 až 249	250 a výše
Maximální rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším stanovením	2	4	6	8

*Tabulka 1: Maximální rozdíl platných stanovení*

Výsledek se vyjádří jako aritmetický průměr v penetračních jednotkách zaokrouhlený na nejbližší celé číslo. [24]

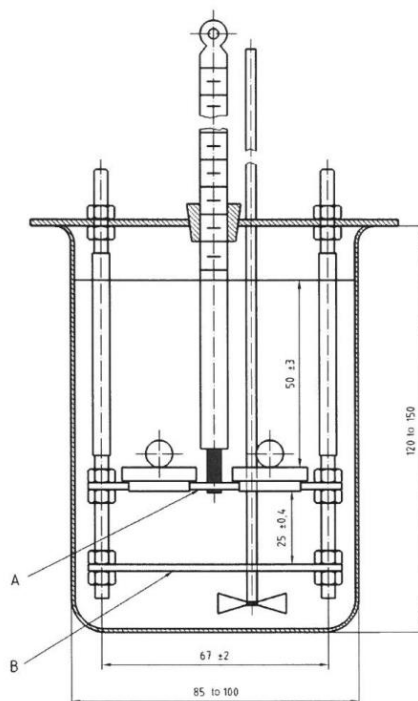


*Obrázek 19: Penetrometr se zkušebním vzorkem*



## 4.2 Stanovení bodu měknutí – metoda kroužek a kulička

Postup zkoušky je popsán v normě ČSN EN 1427: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička.



Obrázek 20: Sestava dvou kroužků s držákem (A) a základní deskou (B) [25]

Touto zkouškou určíme horní mez oboru plasticity. Podstatou této metody je zahřívání dvou kotoučků z asfaltového pojiva řízenou rychlostí ve vodní/glycerinové lázni, které jsou osazeny v mosazných kroužcích. Na povrchu pojiva je umístěna ocelová kulička. Bod měknutí se zaznamená jako průměr teplot, při kterých tyto dva kotoučky změknou natolik, aby umožnily každé z kuliček obalených v asfaltovém pojivu propadnout o vzdálenost  $(25 \pm 0,4)$  mm.



Obrázek 21: Kroužky se zahřátým pojivem na odlévací destičce

Pro měření se používá zkušební zařízení, které obsahuje kroužky, odlévací destičky a dvě kuličky z korozivzdorné oceli. Nedílnou součástí jsou i prstence pro kuličky, držák kroužků a skleněná kádinka s tekutinou, ve které je umístěné míchadlo.



*Obrázek 22: Měření metodou kroužek a kulička*

Připravíme si dva kroužky, které umístíme na odlévací destičku a naplníme zahřátým pojivem. Po vychladnutí je začistíme tak, aby povrch vzorku byl zarovnaný s vrchní hranou kroužků.

Vzorky vložíme do sestavy se středícím zařízením pro kuličky. Kádinka se naplní odvdzdušněnou studenou vodou. Hladina lázně by měla být ve výšce  $(50 \pm 3)$  mm nad horním okrajem kroužků. Poté celou sestavu zchladíme na  $(5 \pm 1)$  °C pro asfalty s předpokládanými body měknutí do 80°C. Pomocí chemických kleští se vloží kuličky do středícího zařízení a při tom musí být zajištěna jejich stejná počáteční teplotu jakou má celá sestava. Připravenou soustavu umístíme do zkušebního přístroje. Voda se zahřívá rychlostí 5 °C/min a je zároveň míchána zespodu. Sleduje se teplota v okamžiku, kdy asfalt obklopující kuličku dosáhne 25 mm propadu, v tu chvíli je potřeba zaznamenat aktuální teplotu lázně.

Tato hodnota je hodnotou bodu měknutí. Rozdíl hodnot mezi pravou a levou kuličkou nesmí být větší než 1 °C, pokud se jedná o bod měknutí pod 80 °C. Pokud nebude splněna tato podmínka, je zapotřebí provést zkoušku znovu. Výsledek je vyjádřen jako průměr teplot se zaokrouhlením na nejbližší 0,2 °C. [25]

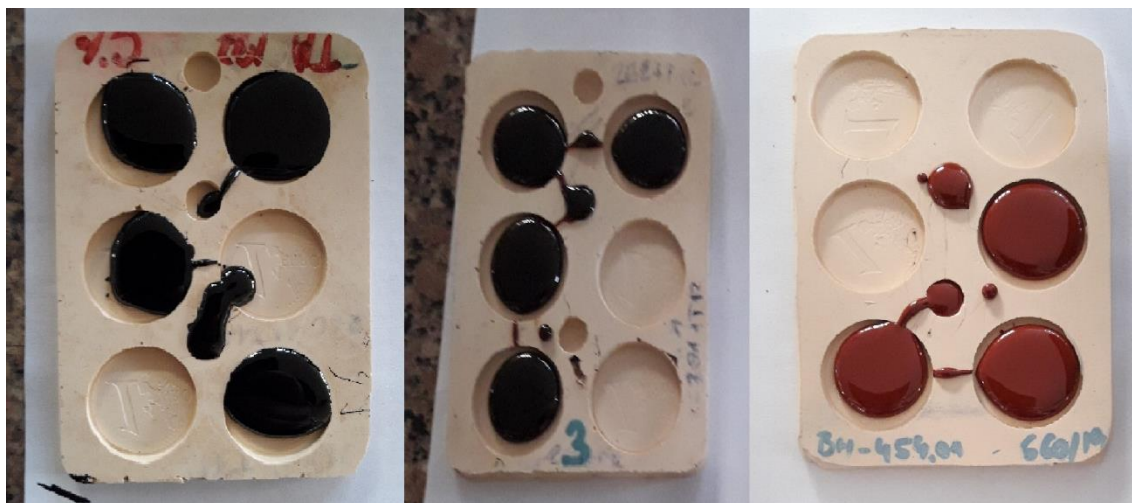
#### 4.3 Stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu v DSR

Zkouška je popsána v normě ČSN EN 14770: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR).

Na temperované zkušební soustavě, v níž je zkušební vzorek asfaltu, se aplikuje oscilující smykové napětí dané velikosti. Měří se odezva deformace pojiva na působící napětí. Alternativně se nechá působit na zkušební vzorek dané smykové přetvoření a měří se vzniklé smykové napětí. S výjimkou specifických účelů se zkouška provádí v oblasti lineárně viskoelastického chování.

Pomůcky pro stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu jsou dynamický smykový reometr (DSR), sušárna, podložky, formy ze silikonu s geometrií typu desky o průměru 25 mm a tloušťkou vzorku 1 mm.

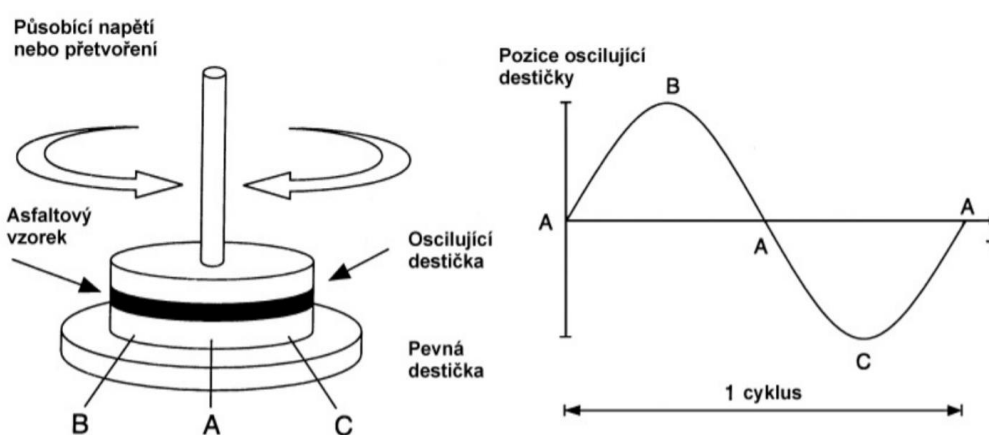
Jako první se nahřeje laboratorní vzorek asfaltového pojiva. Po nahřátí je potřeba asfaltové pojivo promíchat, aby došlo k homogenizaci. Poté se asfaltové pojivo nalije do silikonové formy. Analytický vzorek asfaltového pojiva se nechá vychladnout, poté se přistoupí ke zkoušce.



Obrázek 23: Formy ze silikonu s asfaltovým pojivem

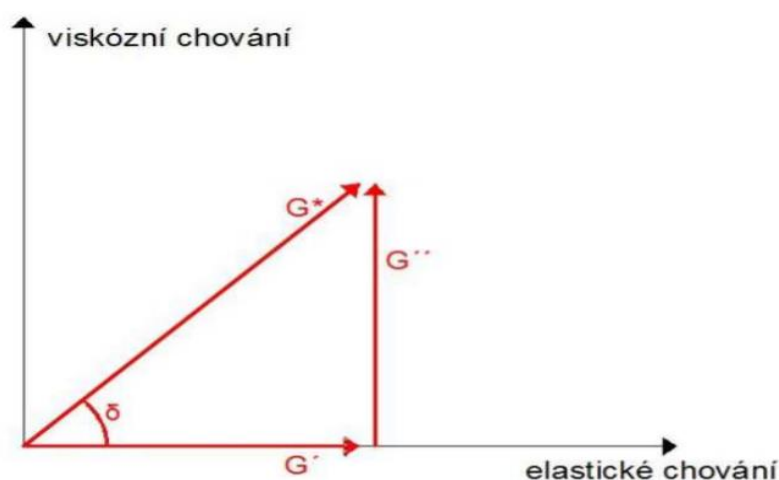
Nejprve se vzorek asfaltového pojiva vyloupne ze silikonové podložky a vloží do reometru. Destičky reometru se předem předehtívají, buďto na teplotu bodu měknutí pojiva plus  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , nebo na  $90\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , podle toho, která teplota je nižší po dobu neméně 30 min, aby došlo ke spojení zkušebního vzorku s destičkami. Dále se vzorek

vloží na spodní geometrii a přitiskne horní geometrii na tloušťku 1,05 mm. Po dobu nejméně 5 minut se udržuje na teplotě přilnutí a poté se přebývajícím pojivo ořízne vhodným ořezávacím nástrojem. Po oříznutí se nastaví zkušební mezera na hodnotu 1,0 mm. Pro zkoušku je nutno zvolit zkušební teplotu vhodnou pro zkoušené pojivo. Zkouší se od nejmenší frekvence a pokračuje se k vyšší frekvenci, to vše za určité teploty. Zatížení oscilací odpovídá harmonicky proměnné (sinusové) funkci namáhání, která nejvíce odpovídá simulaci zatížení ve vozovce od jedoucích vozidel.



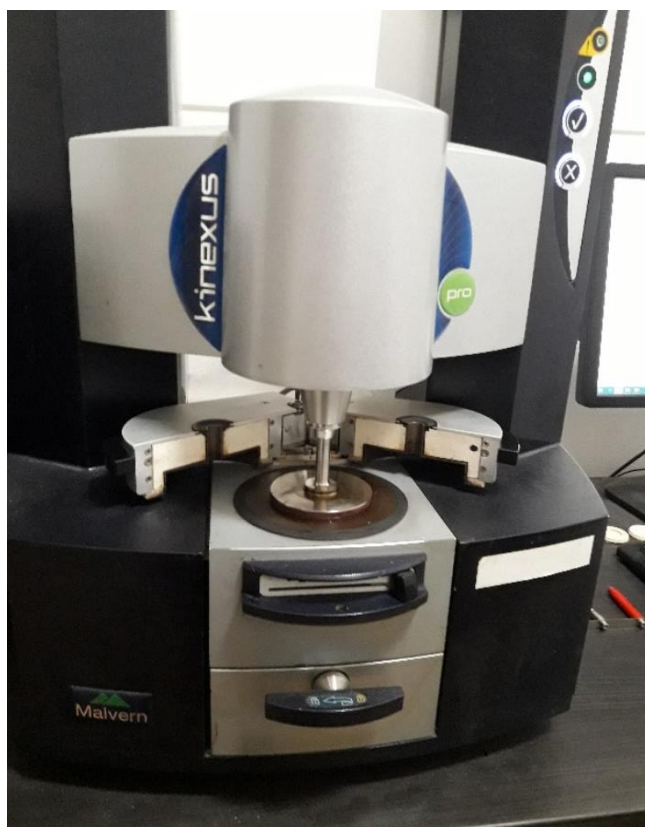
Obrázek 24: Princip dynamického smykového reometru (DSR) [27]

Při vyhodnocení zkoušky je důležité uvést podmínky zkoušení, jedná se o zkušební teplotu a frekvenci. Výsledkem zkoušky je absolutní hodnota komplexního modulu ve smyku  $|G^*|$  v [Pa] na tři platná místa a hodnota úhlu fázového posunu  $\delta$  v [°] na nejblíže 0,1 °C.



Obrázek 25: Složky komplexního modulu [28]

Veličina  $G^*$  je mírou celkové odolnosti materiálu proti přetvoření. Skládá se z elastické složky  $G'$  (reálné) a viskózní složky  $G''$  (ztrátová).  $\delta$  označuje fázový úhel. [26]



Obrázek 26: Dynamický smykový reometr Kinexus

#### 4.4 Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse

Zkouška je popsána v normě ČSN EN 12593. Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse.

Touto zkouškou se určuje křehkost pojiva za nízkých teplot. Asfaltové pojivo se nanese na kovový plíšek, který se stálou rychlostí ochlazuje a opakovaně ohýbá. Zkouška končí ve chvíli, kdy se objeví první prasklina. Zaznamená se teplota, při níž došlo k porušení vzorku asfaltového pojiva, tzv. bod lámavosti podle Fraasse.

Pomůcky pro stanovení bodu lámavosti podle Fraasse jsou plíšky vyrobené z popouštěné pružné oceli, dále je potřeba zařízení pro přípravu plíšků, které se používá k rozehrátí zkoušeného vzorku. Zařízení se skládá z magnetického bloku a kovového podstavce, který je tvořen vyhřívanou částí, která je oddělena od části chlazené. Nedílnou



částí je přístroj pro lámavost podle Fraasse, který se skládá z ohýbacího zařízení, chladičího zařízení (suchý led) a teploměru.



*Obrázek 27: Suchý led*

Před započítím zkoušky je třeba připravit zkušební vzorky, které sestávají z očištěného plíšku, na který je nanесeno pojivo. Plíšek umístíme na magnetický blok, který je vyhříván kovovým podstavcem. Až je pojivo dostatečně tekuté, zajistíme rovnoměrné rozprostření nakláněním podstavce. Takto připravený vzorek se na magnetickém bloku přesune na chlazenou část kovového podstavce, kde se nechá chladit 30 min na laboratorní teplotu. Po vychladnutí vzorku lze přistoupit k samotné zkoušce.



*Obrázek 28: Zkušební plíšky*

Zkouška se provádí nejdříve 30 min po nanesení vzorku na plíšek. Plíšek s asfaltovým pojivem se umístí do ohýbacího zařízení, přičemž je důležité pozorovat, zda nedojde ke zlomení vrstvičky asfaltového pojiva na plíšku. V případě vzniku prasklinky je nutno plíšek nahradit novým. Dále se ohýbací zařízení vloží do zkumavky chladicího zařízení a instaluje se teploměr do výchozí pozice. Nyní se zahájí ochlazování. Počáteční teplota před zahájením ochlazování musí být minimálně 15 °C nad očekávaným bodem lámavosti. V prvních třech minutách probíhá ochlazování konstantní rychlostí 1 °C/min. Zkušební plíšek se začne ohýbat při teplotě o  $(10 \pm 2)$  °C vyšší, než je předpokládaná teplota bodu lámavosti. Ohýbání plíšku se provádí rovnoměrným otáčením kličky ohýbacího zařízení konstantní rychlostí 1 otáčka/s až na doraz, přičemž se se kontroluje vrstvička pojiva, zda nevzniká prasklinka.



*Obrázek 29: Porušení vzorku*

První zkouška je pouze orientační. Z dalších dvou zkoušek se vypočte aritmetický průměr zaokrouhlený na nejbližší celé číslo. Pokud se výsledky neliší o více než 3 °C, je zkouška platná. V opačném případě se provedou další dvě stanovení, přičemž jejich rozdíl musí být maximálně 3 °C. Výsledná hodnota teploty bodu lámavosti podle Fraasse se vyjádří jako aritmetický průměr dvou platných stanovení v °C, zaokrouhlený na nejbližší celé číslo. [29]

#### 4.5 Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – metoda RTFOT

Zkouška je uvedena v normě ČSN EN 12607-1. Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Část 1: Metoda RTFOT.

Podstata metody spočívá v tom, že se tenká vrstva pojiva zahřívá při teplotě 163 °C v sušárně s konstantní teplotou. Vzorky pojiva jsou umístěné ve skleněných nádobkách ve stojanu, který se otáčí konstantní rychlostí tak, aby se asfalt rovnoměrně rozprostřel po vnitřních stranách nádoby, a zároveň je do nádob vháněn vzduch o teplotě 163 °C. Kombinace tepla a vzduchu by se měla projevit změnou hmotnosti nebo



*Obrázek 30: Skleněná nádobka s bezbarvým pojivem*



*Obrázek 32: Skleněná nádobka se standardním pojivem*



*Obrázek 31: Skleněná nádobka s pigmentovým pojivem*



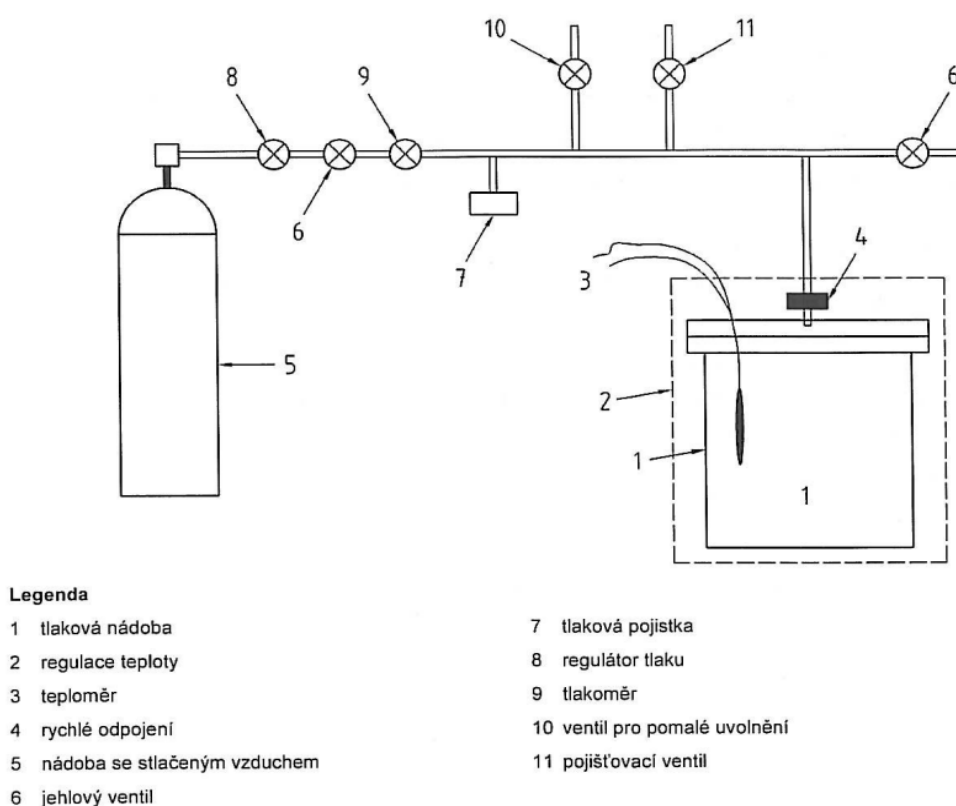
změnou vlastností asfaltového pojiva. Nevýhoda této zkoušky je, že ze skleněných nádobek se špatně dostává pojivo a nikdy z nich nedostaneme 100 % pojiva, které do nádobek bylo nalito.

Pro měření se používá sušárna s elektrickým ohřevem, dále pak průtokoměr, který měří průtok vzduchu v množství  $(4 \pm 0,2)$  l/min. Nedílnou součástí je teplotní měřící zařízení, váhy a skleněné nádoby.

Do skleněné nádoby se nalije  $(35 \pm 0,5)$  g pojiva a nádoba se vloží do sušárny vytemperované na  $163\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Naráz se zkouší pojivo až v 8 nádobkách. Během zkoušky je nádobkami otáčeno, což zabraňuje vytvoření povrchové vrstvičky, a zároveň je přímo do nádobek vháněn horký vzduch. Po uplynutí  $(75 \pm 1)$  min se nádoby vyjmou a slijí do plechovky a zhomogenizují se pro následující zkoušky. [30]

#### 4.6 Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě PAV

Zkouška je popsána v normě ČSN EN 14769. Asfalty a asfaltová pojiva – Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV).



Obrázek 33 Příklad zkušebního zařízení PAV [31]

Princip zkoušky je založen na uchování misek s tenkou nepohyblivou vrstvou pojiva v tlakové nádobě, kde se zahřívá při určité teplotě a za určitého tlaku vzduchu po danou dobu. Zkouška by měla napodobovat změny, ke kterým dochází v pojivu během své životnosti. Je důležité, aby tomuto testu předcházelo simulované stárnutí metodou RTFOT. Vzorek tedy už prošel jednou sekvencí stárnutí.



*Obrázek 34: Misky s nalitým pojivem*

Pro měření se používá tlaková nebo teplotní nádoba, zařízení pro regulaci tlaku, zařízení pro záznam teploty, kovové misky a váhy.

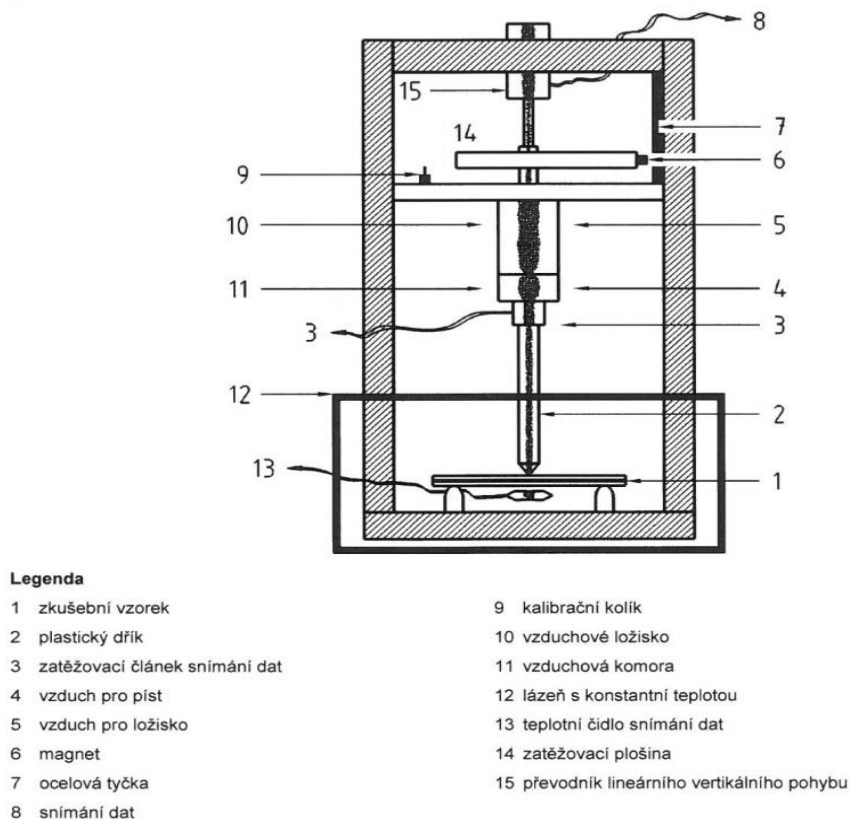


*Obrázek 35: Držák s miskami*

Nádoba PAV se předehřeje na teplotu v rozmezí 80 °C až 115 °C a tlak  $(2,1 \pm 0,1)$  MPa. Po předehřátí se miska položí na váhu a naváží se do ní  $(50 \pm 0,5)$  g pojiva. Navážené vzorky vložíme do držáku misek a umístíme do tlakové nádoby. Po uplynutí stanovené doby stárnutí se pomalu uvolní vnitřní tlak v PAV prostřednictvím uvolňovacího ventilu tak, aby pokles tlaku byl plynulý a k vyrovnání s atmosférickým tlakem došlo za 8 až 15 minut. Okrajové podmínky zkoušky, nastavené v rámci této práce, jsou: teplota 100 °C, tlak 2,1 MPa a doba stárnutí 20 hod. V některých případech mohou zůstat v pojivu bublinky vzduchu. V takovém případě se musí misky s pojivem umístit do vakuové sušárny s teplotou  $(170 \pm 5)$  °C. Po 10 min ustavování rovnováhy se otevře vakuový ventil a tlak se sníží na  $(15 \pm 2,5)$  kPa a tento tlak se udržuje po dobu  $(30 \pm 1)$  min. Po 30 min se misky s pojivem vyjmou ze sušárny. Po ukončení se asfaltové pojivo přelije do jedné sběrné nádoby. [31]

#### 4.7 Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru BBR

Zkouška je popsána v normě ČSN EN 14771. Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR).



Obrázek 36 Schématický nákres BBR [32]

Používá se k měření průhybu ve středu na tříbodovém ohybu trámečku z asfaltového pojiva. BBR (Bending Beam Rheometer) slouží k popsání nízkoteplotních vlastností asfaltového pojiva. Po stanovenou dobu se na střed trámečku vkládá konstantní zatížení a měří se průhyb jako funkce času. Modul tuhosti za ohybu vypočítáme z ohybového napětí a ohybové deformace.



*Obrázek 37: Asfaltové pojivo ve formě pro měření BBR*

Hlavními pomůckami pro stanovení modulu tuhosti za ohybu jsou průhybový trámečkový reometr (BBR) a formy pro zkušební tělíska.

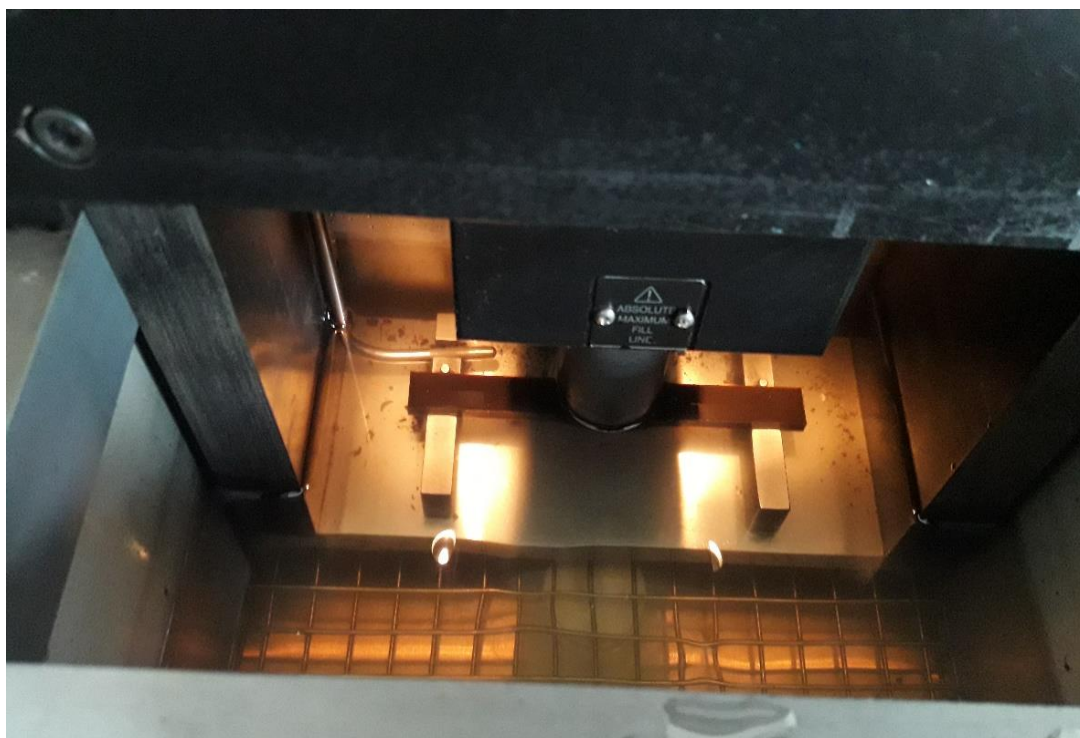
Sestavená forma se očistí a potře se tenkou vrstvou tuku ropného původu, aby se zabránilo přilepení asfaltového pojiva. Nalije se zahřáté a zhomogenizované pojivo z jednoho konce formy k druhému konci tak, aby bylo rovnoměrně nalito s mírným přebytkem. Po naplnění se nechá forma 45 až 60 minut vychladnout při laboratorní teplotě. Po vychladnutí je horní část tělesa seříznuta ohřátou špachtlí do roviny s kraji formy. Zkouška se musí provést do 4 hod po odlití tělísek. Před vyjmutím asfaltového tělesa z



formy se zkušební vzorek umístí do chladicí komory po dobu 5 minut, aby těleso ztuhlo a dalo se jednoduše z formy vyjmout.

Před zkouškou každé sady zkušebních těles se zkontroluje nastavení kontaktního zatížení a zkušebního zatížení. Podle očekávané úrovně tuhosti se zvolí první teplota zkoušení. Provede se kontrola, zda teplota lázně je stálá nejméně po dobu 20 min. Po odstranění zkušebního tělesa z formy se těleso ihned umístí do zkušební lázně a temperuje se při zkušební teplotě po dobu  $60 \text{ min} \pm 2 \text{ min}$  před zahájením zkoušky. Před umístěním tělíska na podpěry zjistíme tloušťku tělíska. Poté působíme konstantní zatížení od 25 mN do 45 mN a zaznamenáme údaj převodníku posunu. Tělísko obrátíme a změříme druhý údaj. Jestli je rozdíl obou naměřených hodnot do 1,0 mm vypočte se jejich aritmetický průměr.

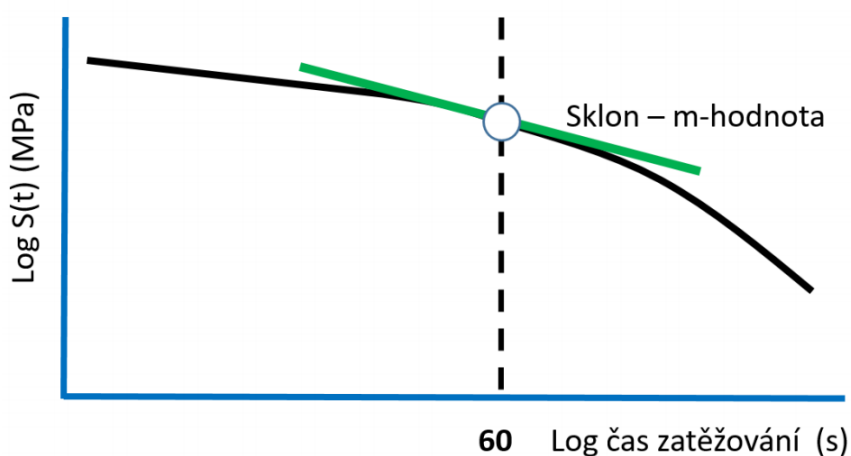
Měření, pro které je průhyb středu zkušebního tělíska menší než 0,08 mm nebo větší než 4,0 mm je nevěrohodné.



*Obrázek 38: Průhybový trámečkový reometr (BBR)*

Vytvoří se graf závislosti naměřeného zatížení a průhybu zkušebního tělíska v intervalu 0,5 s. nebo méně, počínaje vložení usazovacího zatížení  $980 \text{ mN} \pm 50 \text{ mN}$  po dobu  $1,0 \pm 0,1 \text{ s}$ . [32]

Výsledkem zkoušky je modul tuhosti za ohybu  $S(t)$  [MPa] a  $m$ -hodnota, která značí sklon tečny logaritmu tuhosti v závislosti na logaritmu času. Tento parametr vyjadřuje schopnost asfaltového pojiva relaxovat.  $M$ -hodnota  $m(t)$  stejně jako tuhost pojiva (parametr  $S(t)$ ) jsou běžně určovány po 60 s. měření. Vyšší  $m$ -hodnota indikuje rychlejší schopnost relaxace (rychlejší pokles tuhosti v závislosti na čase). Výsledky jsou zaokrouhlená na tři platná místa.




Obrázek 39: Způsob odvození  $m$ -hodnoty [33]

## 5. POUŽITÉ MATERIÁLY

Asfaltová pojiva, na kterých byly v této bakalářské práci prováděny laboratorní zkoušky, byla dodána firmou TOTAL ČESKÁ REPUBLIKA s.r.o. Jedná se konkrétně o bezbarvé syntetické pojivo třídy 50/70 a syntetické pigmentované pojivo třídy 50/70. Vlastnosti těchto poživ byly srovnány se standardním silničním asfaltem třídy 50/70. Informace o pojivech jsou uvedeny v tabulce 2.

Obarvené pojivo bylo vyrobeno smísením syntetického pojiva Kromatis® třídy 50/70 s pigmentem v poměru 3:1, přičemž mísení bylo provedeno laboratorně v koloidním mlýnu firmy TOTAL ČESKÁ REPUBLIKA s.r.o.

Výchozí pojiva					
Označení pojiva	Zkráceně	Výrobce	Barva zobrazena v grafech a tabulkách		
			Nezestárlé	RTFOT	RTFOT + PAV
Standardní silniční asfalt třídy 50/70	Standardní	Srovnávací			
Bezbarvé syntetické pojivo třídy 50/70	Bezbarvé	Total s.r.o.			
Syntetické pigmentované pojivo třídy 50/70	Pigmentované	Total s.r.o.			

Tabulka 2: Výchozí materiály

## 6. VÝSLEDKY ZKOUŠEK

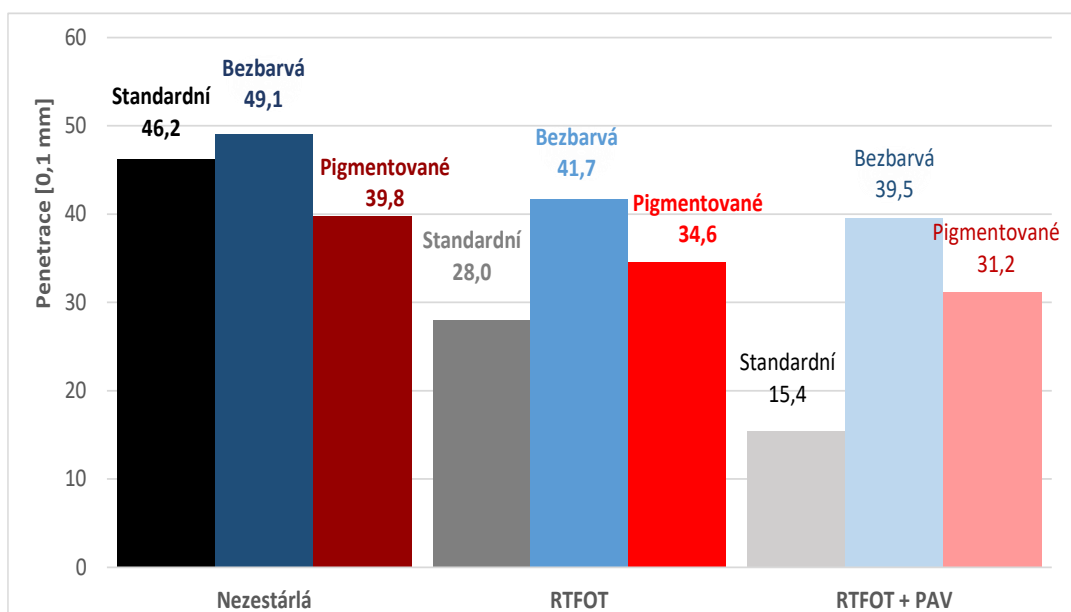
Zkoušky na asfaltovém pojivu probíhaly v laboratoři Ústavu pozemních komunikací v prostorách Stavební fakulty Vysokého učení technického v Brně. Všechny zkoušky byly provedeny dle postupu uvedeného v normě pro konkrétní zkušební metodu, viz bod 4. Použité zkušební metody. Výsledky jsou zpracovány do tabulek a grafů, vyhodnoceny a shrnuty v závěru bakalářské práce.

### 6.1 Stanovení penetrace jehlou

Zkušební metoda ke stanovení penetrace jehlou byla provedena dle platné normy ČSN EN 1426 a byla stručně popsána v bodu 4.1. Výsledky jsou zapsány v tabulce 3. a průměrné hodnoty jsou také zobrazeny v grafech.

Penetrace [0,1 mm]				Penetrace [0,1 mm]				Penetrace [0,1 mm]			
n	Standardní			n	Bezbarvá			n	Pigmentované		
	Nezestárlá	RTFOT	RTFOT + PAV		Nezestárlá	RTFOT	RTFOT + PAV		Nezestárlá	RTFOT	RTFOT + PAV
1	46,6	28,9	15,9	1	49,0	43,1	38,9	1	40,4	35,1	31,8
2	46,1	27,5	15,9	2	49,9	41,1	39,5	2	39,9	33,8	30,4
3	45,8	27,7	14,4	3	48,3	40,8	40,1	3	39,1	34,8	31,5
$\bar{x}$	46,2	28,0	15,4	$\bar{x}$	49,1	41,7	39,5	$\bar{x}$	39,8	34,6	31,2

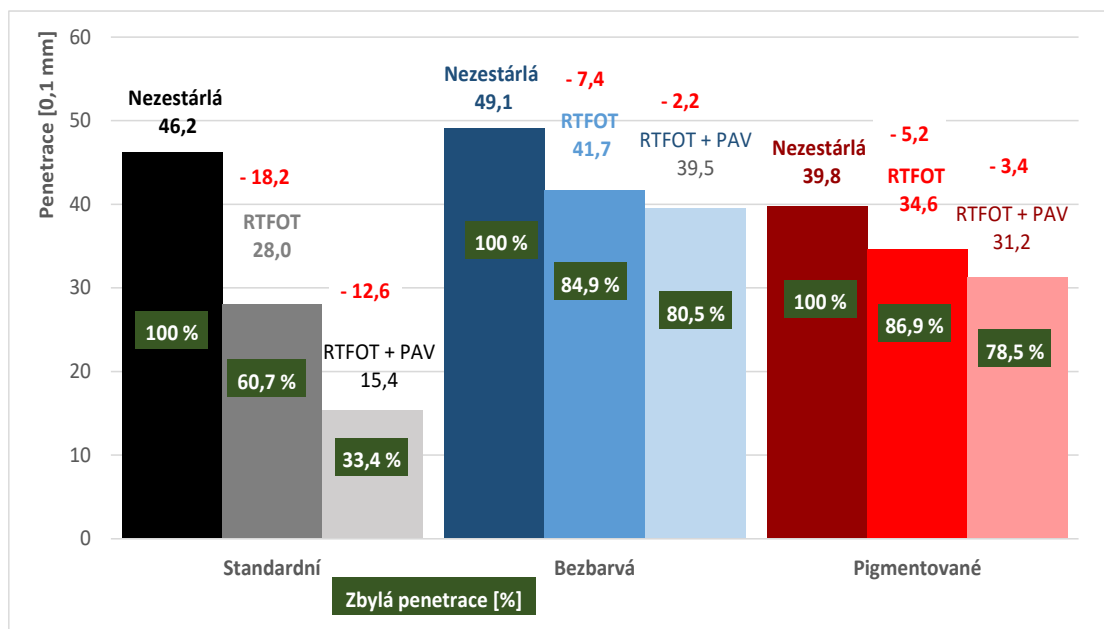
Tabulka 3: Výsledky zkoušky penetrace jehlou



Graf 1: Srovnání výsledků penetrace jehlou podle délky vlivu stárnutí



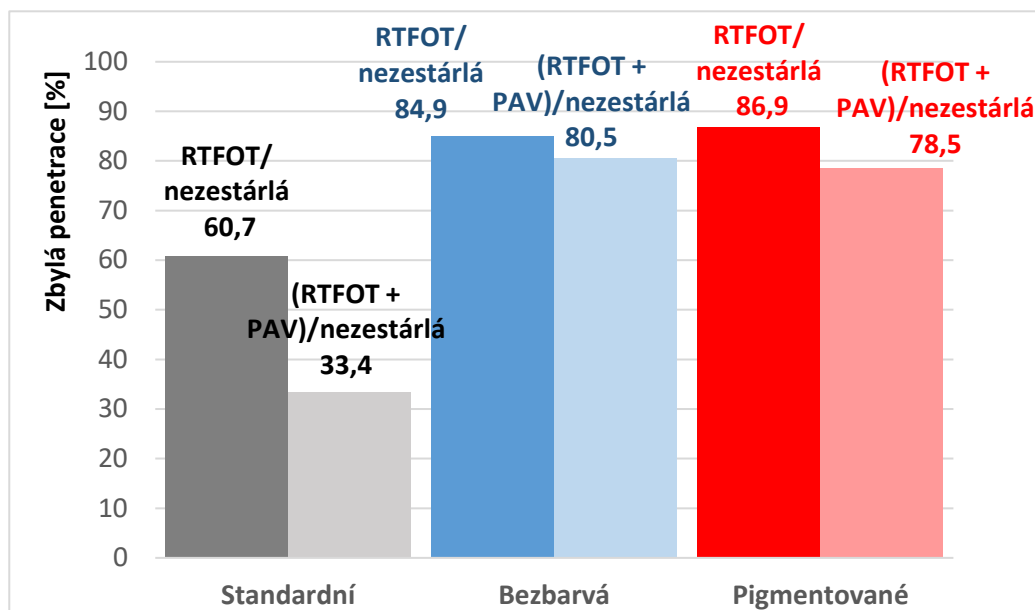
Z výsledků zkoušky penetrace jehlou je zřejmé, že všechna tři pojiva dosahovala mírně nižší hodnoty penetrace jehlou, než požaduje norma ČSN 65 7204 pro silniční asfalty třídy 50/70, to mohla způsobit například delší doba uložení asfaltových pojiv v sušárně.



Graf 2: Srovnání výsledků penetrace jehlou podle druhu pojiva

V grafech 1–2 jsou uvedeny výsledky penetrace asfaltových pojiv a jsou rozděleny do skupin podle délky stárnutí nebo druhu pojiva. Z výše uvedených grafů lze odvodit závěr, že hodnoty penetrace pojiv se snižují vlivem stárnutí. K největšímu snížení penetrace došlo u standardního pojiva o 18,2 [0,1 mm] po metodě RTFOT a o dalších 12,6 [0,1 mm] po metodě RTFOT + PAV. K nejmenšímu snížení penetrace o 5,2 [0,1 mm] došlo u pigmentového pojiva po metodě RTFOT. Po metodě RTFOT + PAV má nejmenší snížení hodnoty penetrace bezbarvé pojivo o 2,2 [0,1 mm].

Na grafu 3 je vynesena zbylá penetrace asfaltových pojiv vlivem stárnutí metodou RTFOT a metodou RTFOT + PAV. Požadavek z normy ČSN 65 7204, aby zbylá penetrace byla vyšší než 50 % po zkoušce RTFOT pro silniční asfalty třídy 50/70, tuto hodnotu pojiva splnila.



Graf 3: Zbýlá penetrace asfaltových pojiv v procentech

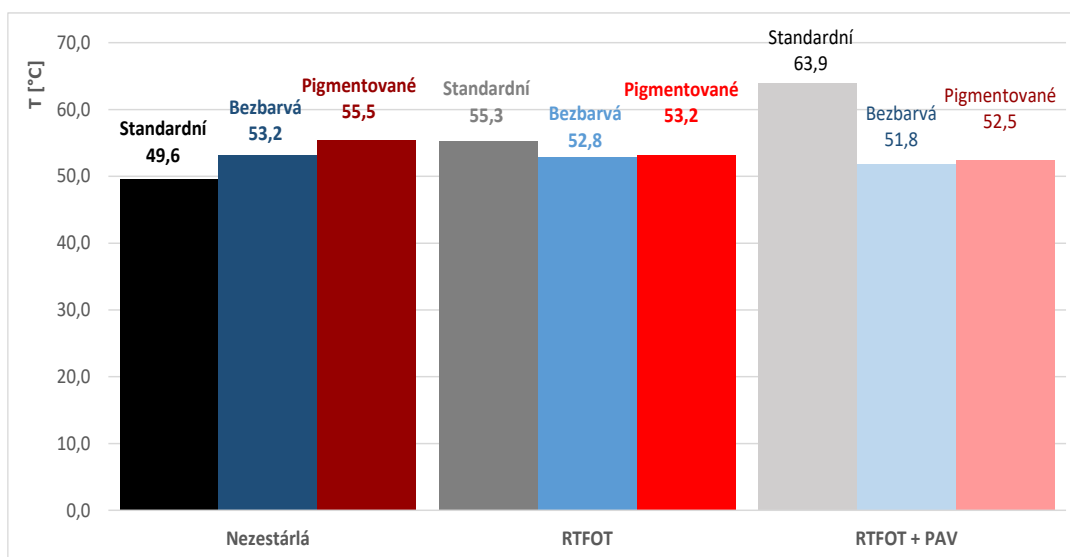
Z výsledků měření lze vidět, že hodnota penetrace syntetických pojiv je stárnutím ovlivněna mnohem méně, než penetrace běžného srovnávacího silničního asfaltu třídy 50/70. Pojiva syntetická téměř nezestárnou, jsou tedy více odolná vůči stárnutí na rozdíl od standardního asfaltového pojiva.

## 6.2 Stanovení bodu měknutí – metoda kroužek a kulička

Zkušební metoda ke stanovení bodu měknutí byla provedena dle platné normy ČSN EN 1427 a byla stručně popsána v bodu 4.2. Stanovení bodu měknutí bylo provedeno na nezestárlých pojivech, pojivech zestárlých metodou RTFOT a metodou RTFOT + PAV. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 4 a pro srovnání jsou průměrné hodnoty zobrazeny v grafech 5–7.

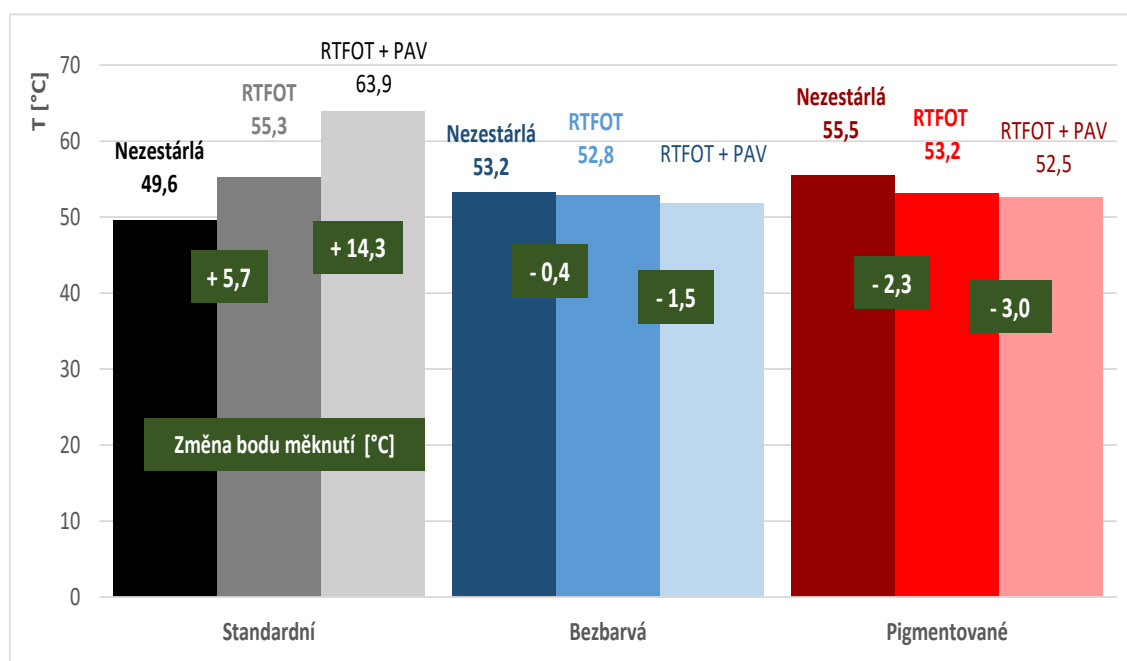
	Bod měknutí [°C]				Bod měknutí [°C]				Bod měknutí [°C]		
KK	Standardní			KK	Bezbarvá			KK	Pigmentované		
	Nezestárlá	RTFOT	RTFOT + PAV		Nezestárlá	RTFOT	RTFOT + PAV		Nezestárlá	RTFOT	RTFOT + PAV
Levá	49,7	55,0	63,9	Levá	53,2	53,1	51,8	Levá	55,5	52,9	52,6
Pravá	49,5	55,5	63,9	Pravá	53,2	52,5	51,7	Pravá	55,4	53,4	52,4
$\bar{x}$	49,6	55,3	63,9	$\bar{x}$	53,2	52,8	51,8	$\bar{x}$	55,5	53,2	52,5

Tabulka 4: Výsledky zkoušky Kroužek a kulička



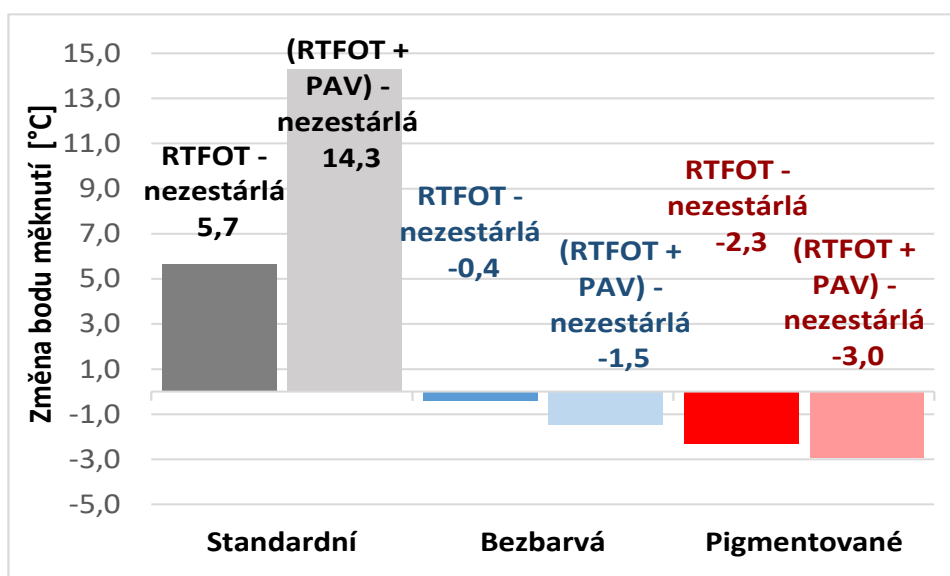
Graf 4: Srovnání výsledků bodu měknutí podle délky vlivu stárnutí

Podle normy ČSN 65 7204 by měl bod měknutí vycházet v nezestárlém stavu vyšší než 46 °C, tuto podmínku pojiva dodržela. Z grafů a tabulek vyplývá, že vlivem stárnutí metodou RTFOT i metodou RTFOT + PAV dochází ke zvýšení bodů měknutí u standardního pojiva. Syntetická pojiva vykazují neobvyklá chování, protože vlivem stárnutí hodnota bodu měknutí klesá. Čím vyšší je hodnota bodu měknutí, tím se zvyšuje odolnost proti tvorbě trvalých deformací (například vyjeté koleje), ale převážně na úkor snížení penetrace pojiv a jejich následných náchylností na vznik trhlin.



Graf 5: Srovnání výsledků bodu měknutí podle druhu pojiva

Pojiva splnila předepsaný požadavek normy ČSN 65 7204 na změnu bodu měknutí, který je maximálně 9 °C po zkoušce RTFOT pro silniční asfalty třídy 50/70. Nejvyšší změny bodu měknutí vykazovalo pojivo standardní s navýšením bodu měknutí o 5,7 °C metodou RTFOT a o 14,3 °C metodou RTFOT + PAV. Nejnižší změny bodu měknutí byly naměřeny u pojiva bezbarvého kde se bod měknutí snížil o 0,4 °C metodou RTFOT a o 1,5 °C metodou RTFOT + PAV. Syntetická pojiva jsou stejně jako u penetrace více odolná vůči vlivu stárnutí než standardní pojivo.

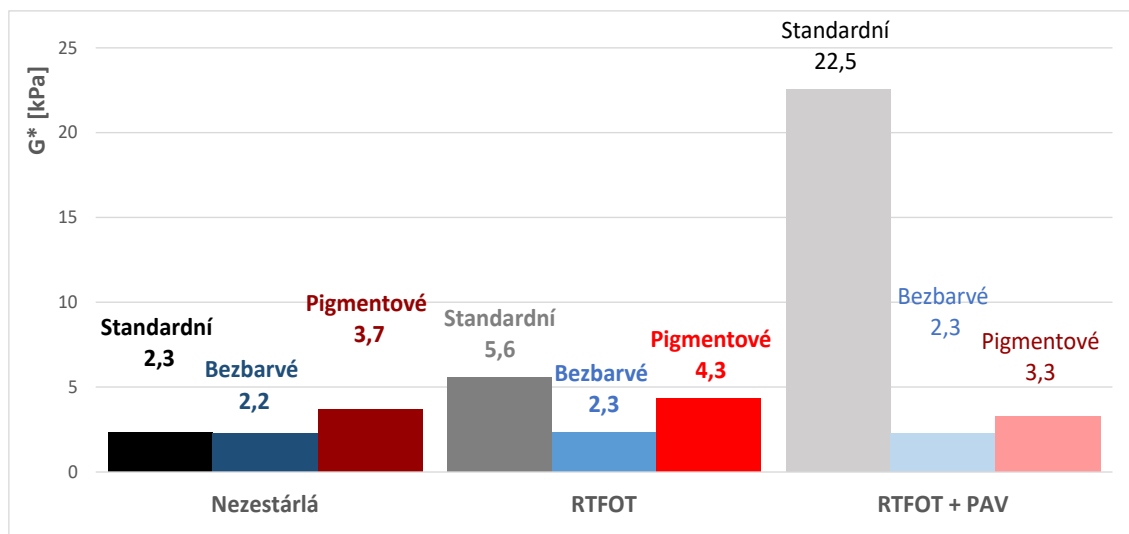


Graf 6: Změna bodu měknutí [°C]

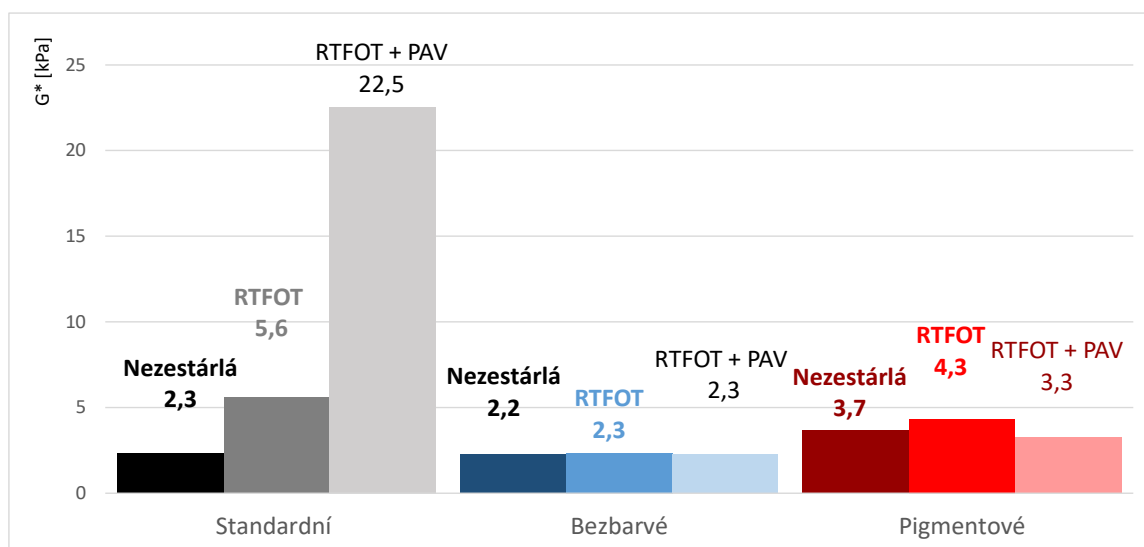
### 6.3 Stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu v DSR

Stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu bylo provedeno dle ČSN EN 14770. Postup zkoušky je definován v kapitole 4.3. Pro stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu byl použit dynamický smykový reometr s geometrií typu desky o průměru 25 mm a tloušťkou vzorku 1 mm. Komplexní smykový modul a fázový úhel byl stanoven na pojivech nezestárlých, zestárlých metodou RTFOT a zestárlých metodou RTFOT+PAV v režimu oscilace s řízeným smykovým přetvořením. Při měření byl nastaven frekvenční rozsah zatěžování od 0,1 Hz do 10 Hz. Výsledky měření komplexního smykového modulu a fázového úhlu jsou znázorněny na grafech 7–22.

Vyhodnocení komplexního smykového modulu a fázového úhlu se provedlo při zkušební teplotě 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz.



Graf 7: Komplexní smykový modul  $G^*$  při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz podle délky vlivu stárnutí

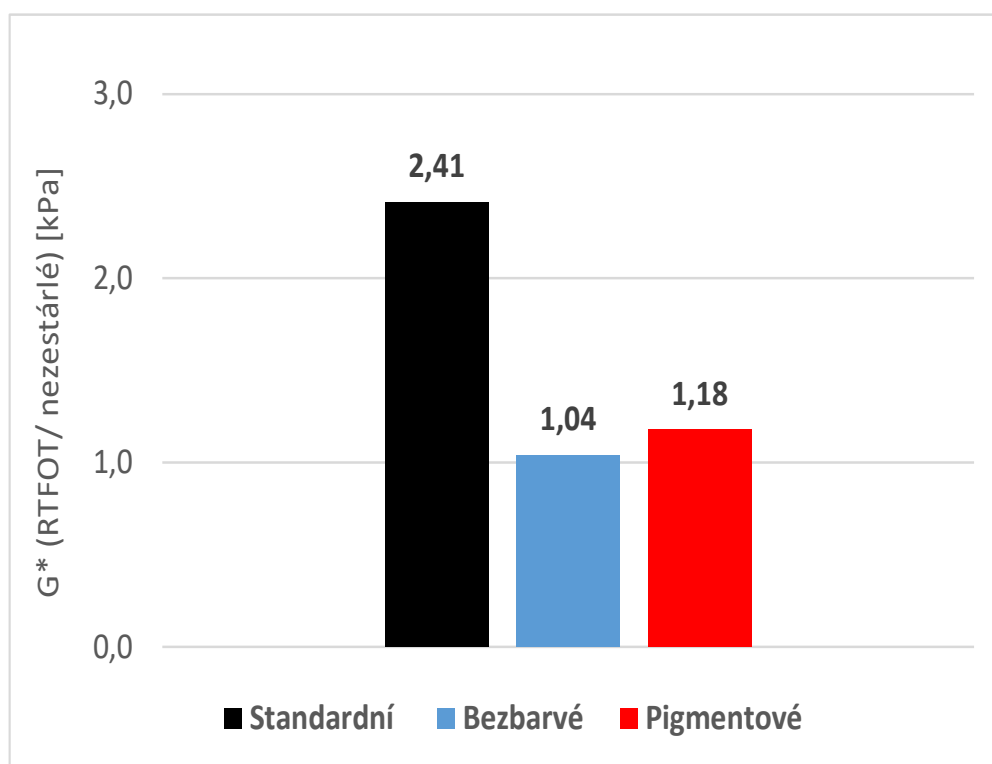


Graf 8: Komplexní smykový modul  $G^*$  při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz podle druhu pojiva

Z grafů 7–8 vidíme, že u standardního pojiva vlivem stárnutí dochází k značnému zvýšení komplexního smykového modulu po zkoušce RTFOT, to je obvyklé chování. Bezbarvé syntetické pojivo má skoro konstantní hodnoty. Komplexní smykový modul pigmentového pojiva se minimálně zvyšuje po zkoušce RTFOT a následně klesá. Komplexní smykový modul nám vyjadřuje odpor vůči deformacím. Čím více se komplexní

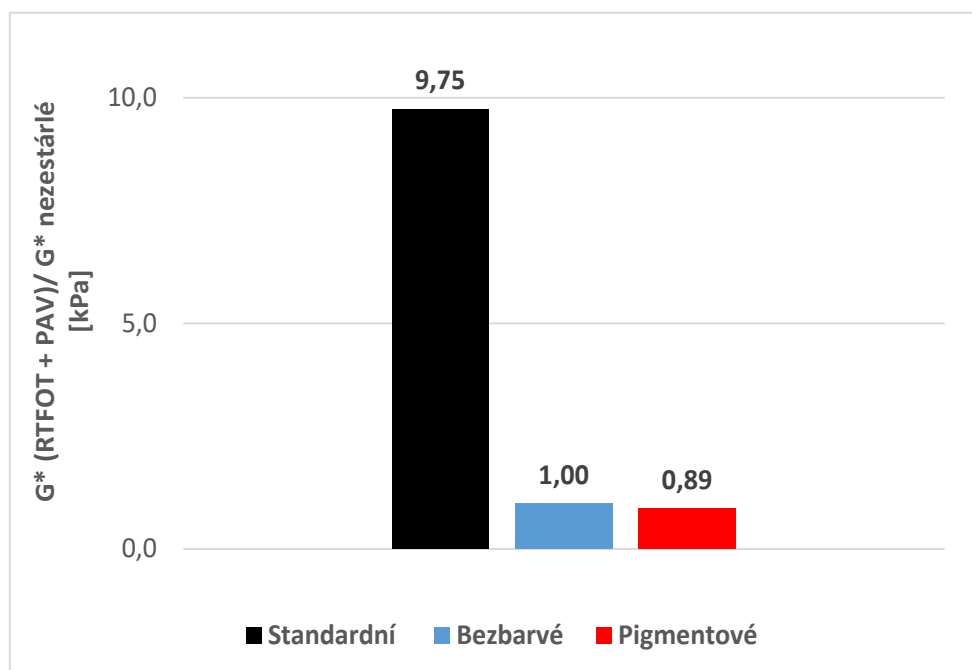
smykový modul asfaltového pojiva zvyšuje vlivem stárnutí, tím se zvyšuje jeho tuhost. U nezestárlých asfaltových pojiv dosahovalo nejnižší hodnoty komplexního smykového modulu u bezbarvého pojiva 2,2 kPa a stejně, tak bylo nejnižší i po metodě RTFOT a RTFOT + PAV s hodnotou 2,3 kPa. Nejvyšší hodnoty komplexního smykového modulu v nezestárlém stavu dosáhlo pigmentové pojivo s hodnotou 3,7 kPa. Nejvyšší nárůst smykového modulu byl naměřen u standardního pojiva. Po zkoušce RTFOT dosahovalo nejvyšší hodnoty komplexního smykového modulu standardní pojivo s hodnotou 5,6 kPa a následně i po zkoušce RTFOT + PAV s hodnotou 22,5 kPa. Nejvyšší změny vlivem stárnutí vykazovalo standardní pojivo po zkoušce RTFOT se hodnota zvýšila o 3,3 kPa a po zkoušce RTFOT + PAV o 16,9 kPa.

Na Grafech 9–10 můžeme vidět indexy stárnutí komplexní modul ve smyku  $G^*$ , které podrobněji ukazují, jak razantně se zvyšuje komplexní smykový modul standardního pojiva na rozdíl od syntetických pojiv. Index stárnutí je určen jako podíl komplexního smykového modulu zestárlého pojiva a pojiva nezestárlého.

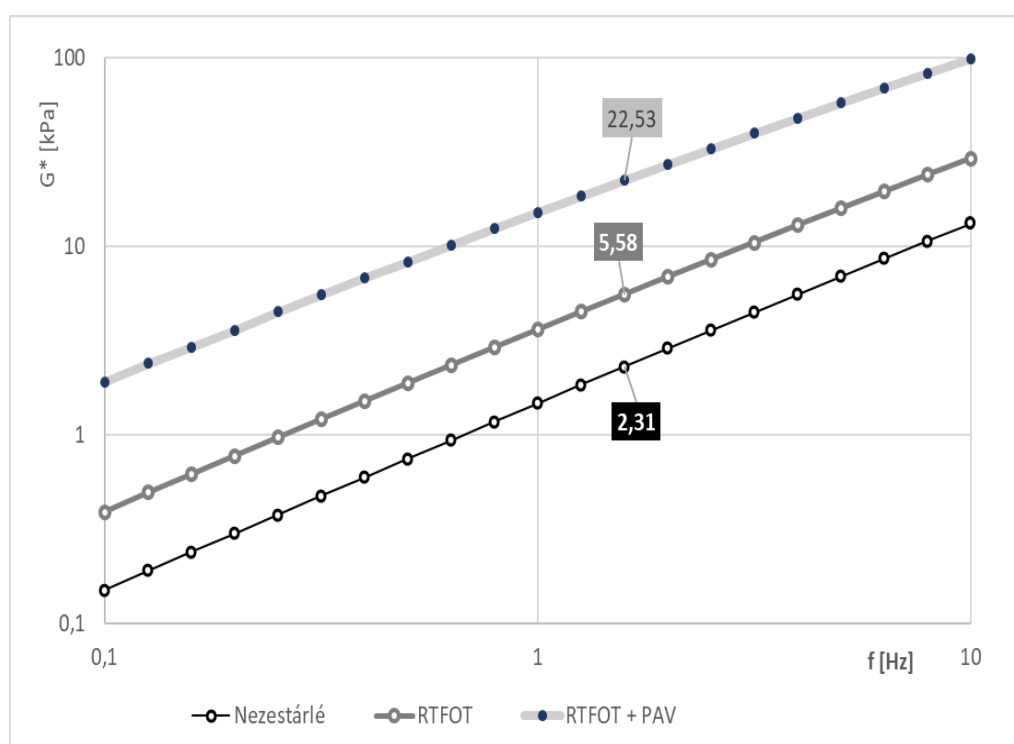


Graf 9: Index stárnutí komplexní modul ve smyku  $G^*$  (RTFOT/ nezestárlé)  
[kPa]

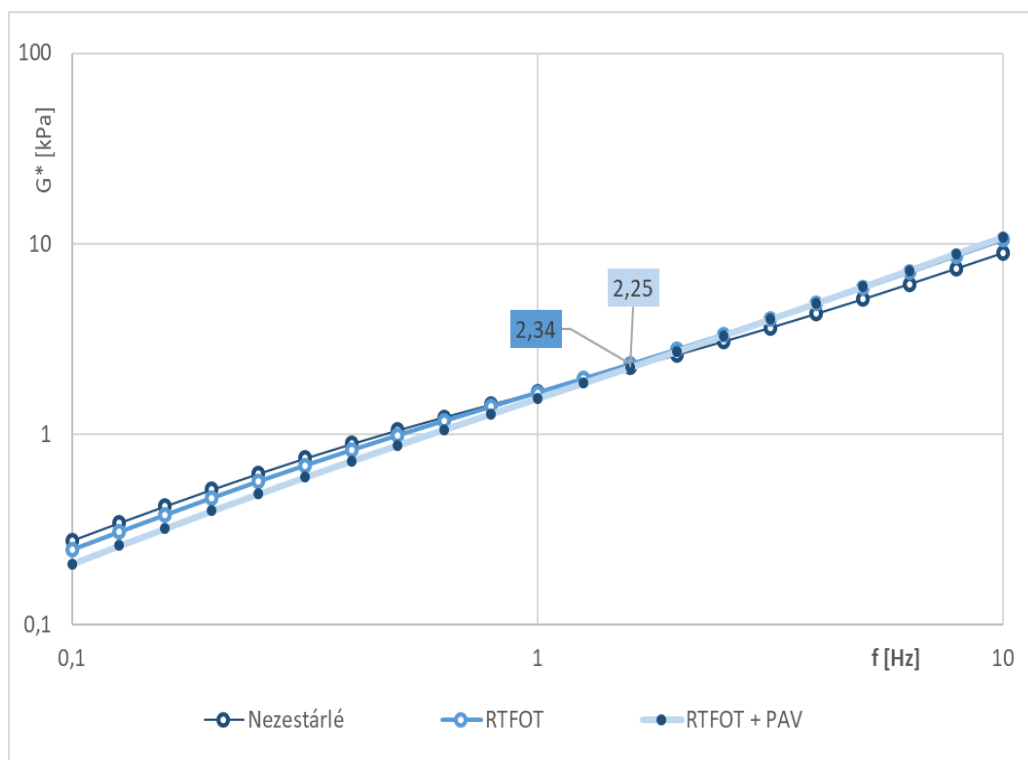




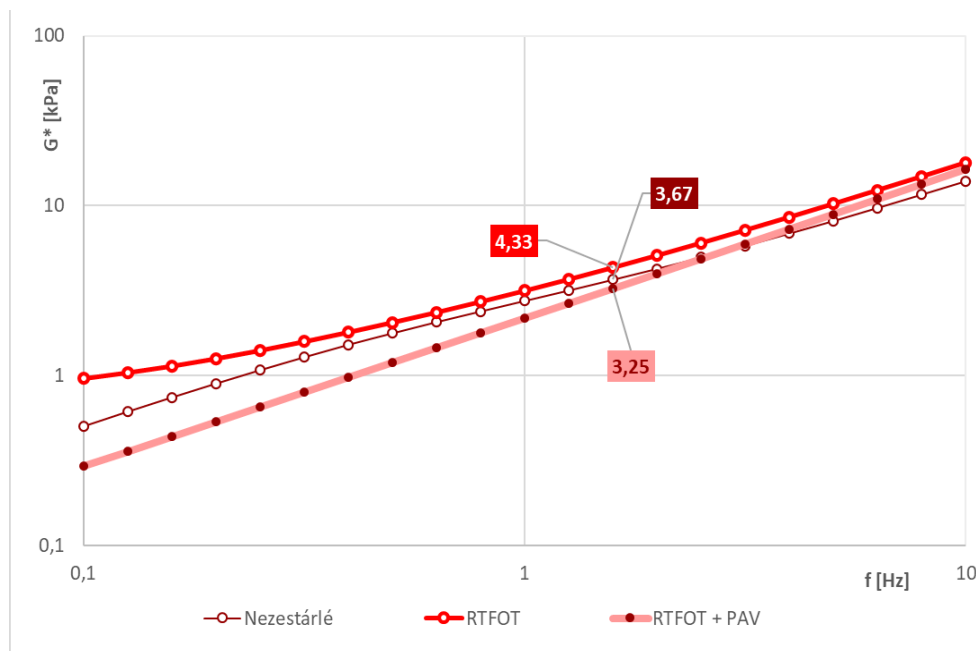
Graf 10: Index stárnutí komplexní modul ve smyku  $G^*(RTFOT + PAV) / \text{nezestárlé [kPa]}$



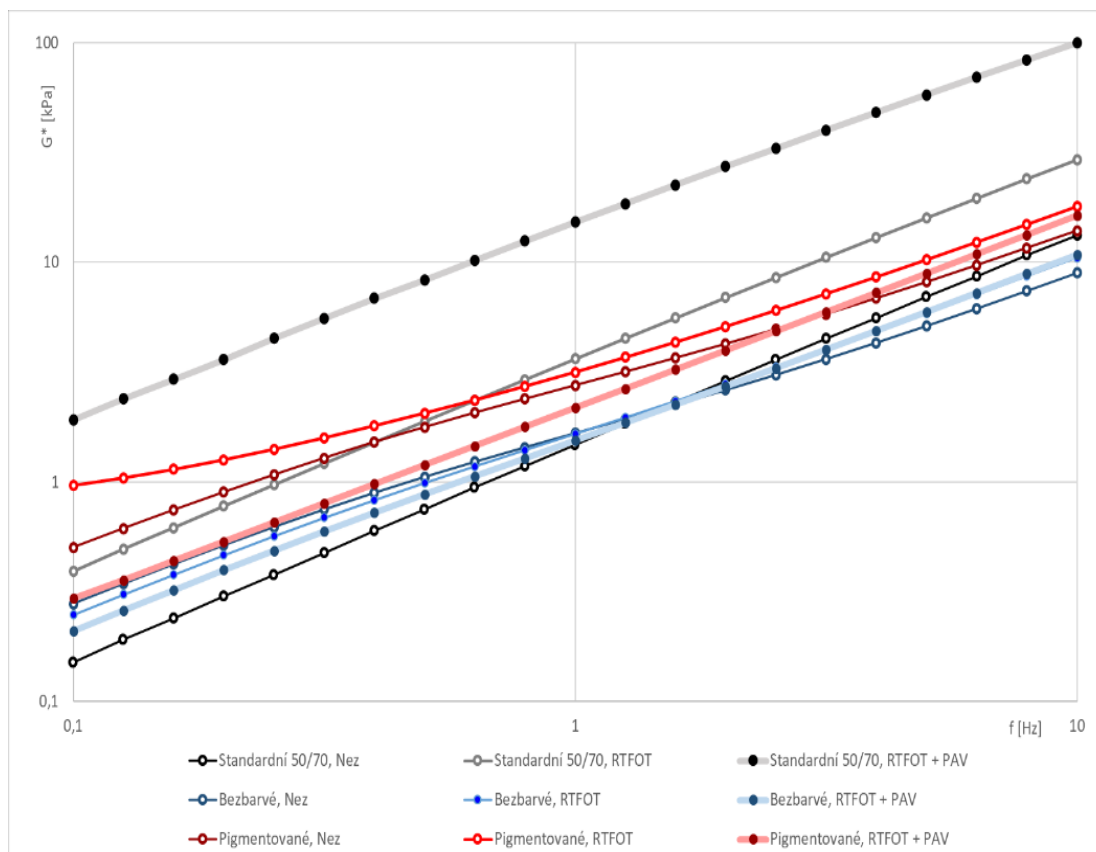
Graf 11: Isotermie komplexního modulu ve smyku ( $G^*$ ) při teplotě 60 °C – standardní pojivo



Graf 12: Isotermie komplexního modulu ve smyku ( $G^*$ ) při teplotě 60 °C – bezbarvého pojiva



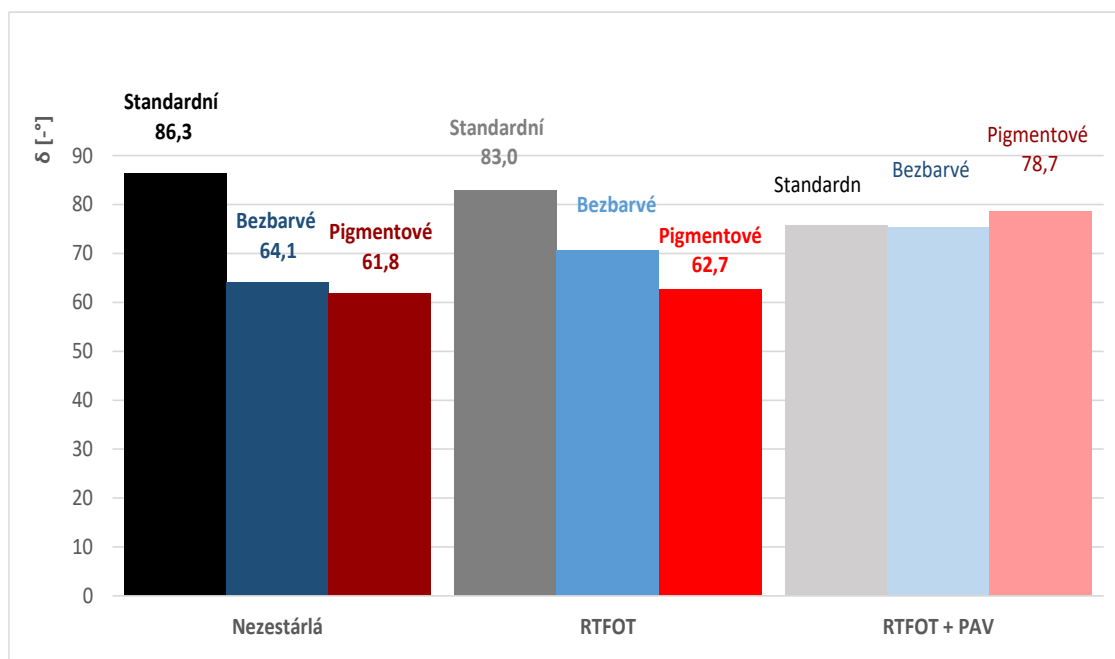
Graf 13: Isotermie komplexního modulu ve smyku ( $G^*$ ) při teplotě 60 °C – pigmentované pojivo



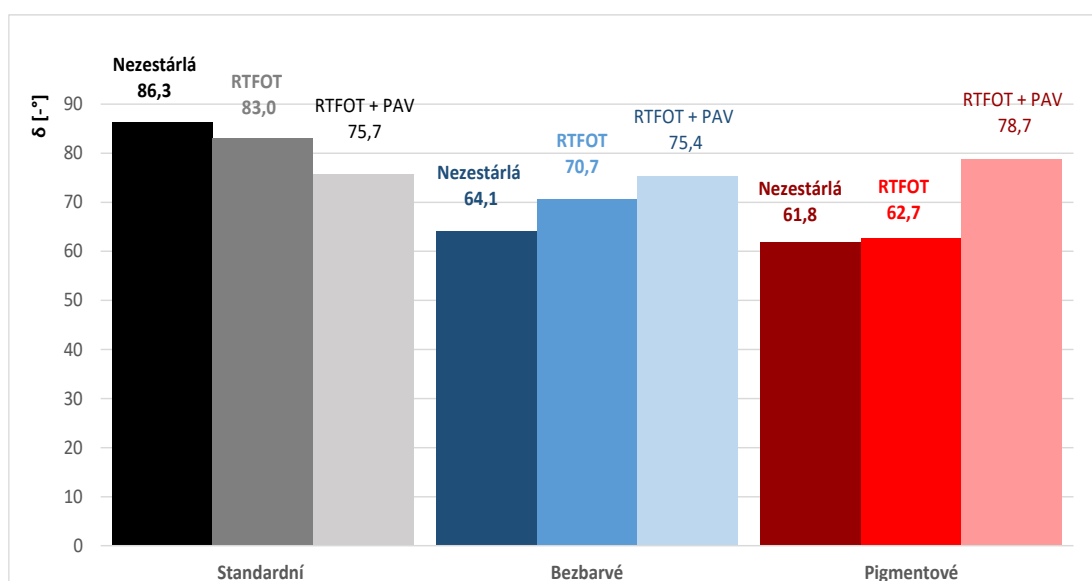
*Graf 14: Isotermie komplexního modulu ve smyku ( $G^*$ ) při teplotě 60 °C všech pojiv*

Na grafech 11–14 vidíme isotermy komplexního modulu ve smyku ( $G^*$ ) při teplotě 60 °C, které jsou velmi závislé na zkušební frekvenci zatěžování. Isotermie jsou křivky, které vyjadřují chování asfaltového pojiva při konstantní teplotě. Z grafu je vidět silná závislost asfaltových pojiv na frekvenci zatěžování, kdy s rostoucí frekvencí zatížení roste komplexní smykový modul asfaltových pojiv.

Z fázového úhlu můžeme vyčíst viskoelastické chování asfaltového pojiva. Čím je fázový úhel nižší, tím je pojivo odolnější vůči deformaci, má snahu se vracet do svého původního tvaru a je pružné, elastické. Čím je fázový úhel vyšší, převládá nevratná, plastická složka neboli „ztrátový modul“. Nejvyšší hodnoty fázového úhlu lze pozorovat u standardního pojiva v nezestárlém stavu 86,3 °, po metodě RTFOT 83,0 ° a po metodě RTFOT + PAV 75,7 °. Nejnižší hodnoty fázového úhlu jsou u pojiva pigmentovaného



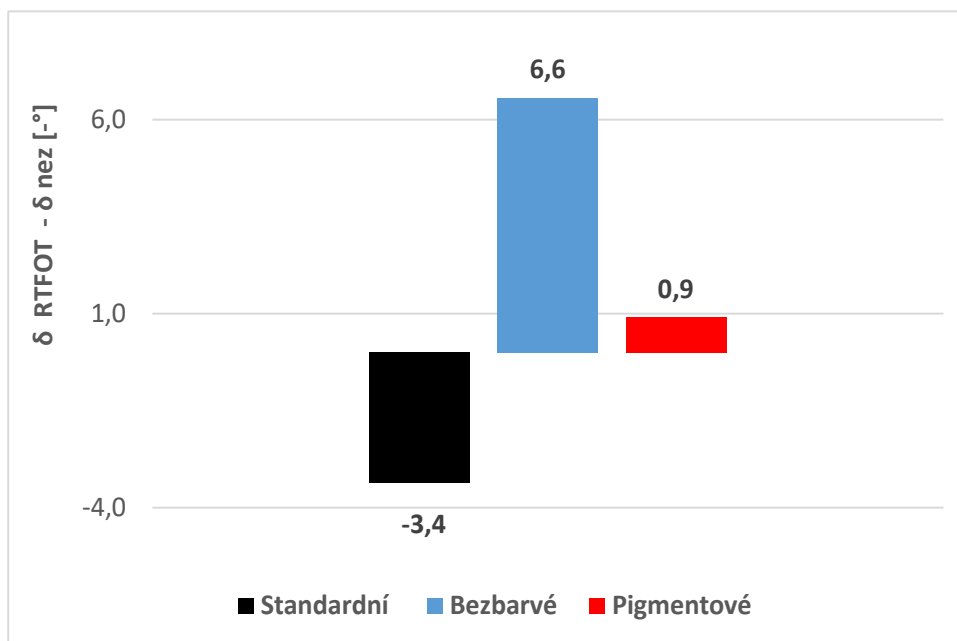
Graf 16: Fázový úhel ( $\delta$ ) při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz podle délky vlivu stárnutí



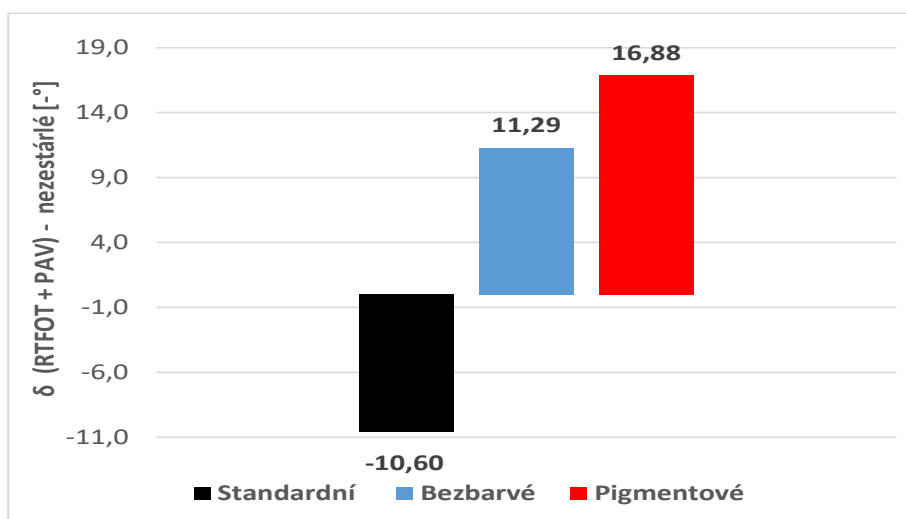
Graf 15: Fázový úhel ( $\delta$ ) při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz podle druhu pojiva

v nezestárlém stavu  $61,8^\circ$  a i po metodě RTFOT  $62,7^\circ$  jen po metodě RTFOT + PAV má nejnižší hodnoty bezbarvé pojivo se  $75,4^\circ$ .

Nejvyšší změny fázového úhlu po metodě RTFOT vykazuje bezbarvé pojivo, jehož fázový úhel se zvyšuje o  $6,6^\circ$  a nejnižší změny jsou u pigmentového pojiva, kdy se fázový úhel zvýšil jen o  $0,9^\circ$ . Po metodě RTFOT + PAV je nejvyšší změna u pojiva pigmentového, u kterého se fázový úhel zvyšuje o  $16,0^\circ$  a nejnižší u pojiva bezbarvého, kde dochází k nárůstu o  $4,7^\circ$ . Obvyklé chování fázového úhlu je, že vlivem stárnutí klesá, jak je to vidět u standardního pojiva.

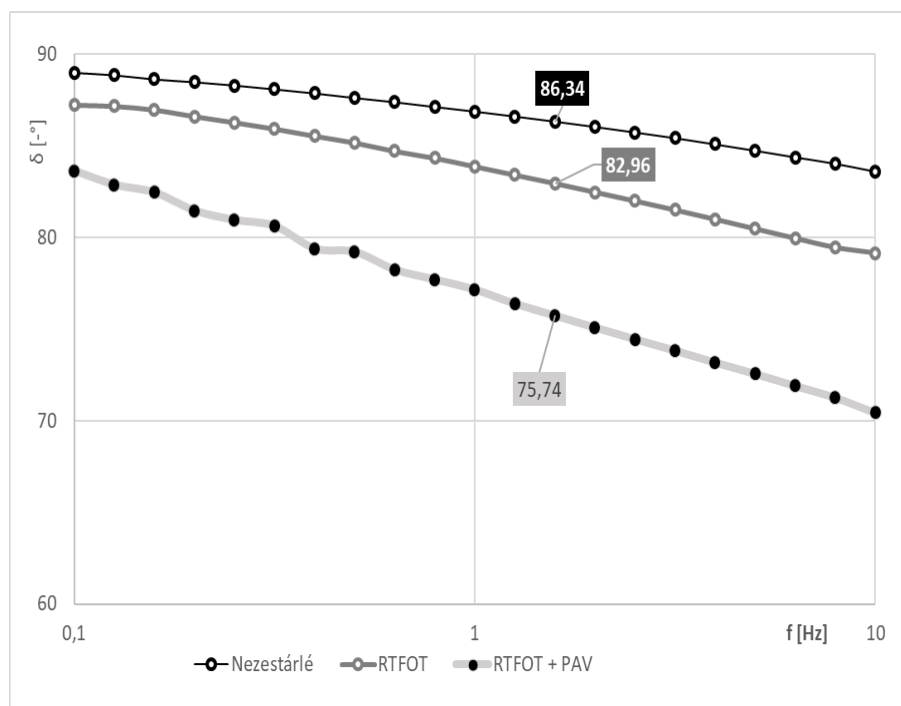


Graf 17: Index stárnutí fázového úhlu  $\delta$  (RTFOT – nezestárlé) [ $^\circ$ ]

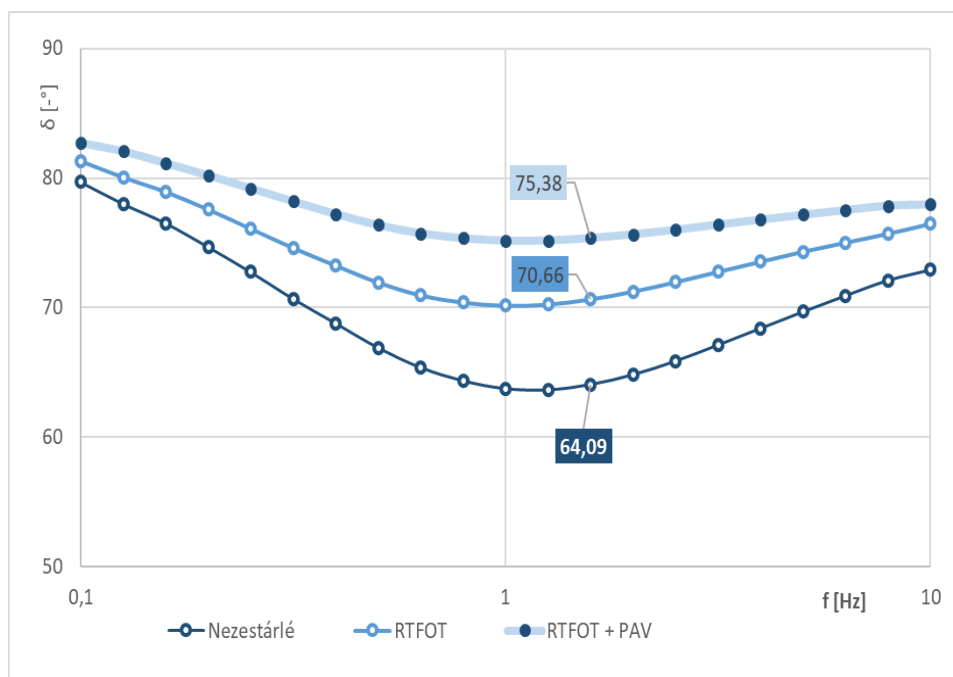


Graf 18: Index stárnutí fázového úhlu  $\delta$  (RTFOT + PAV) - nezestárlé [ $^\circ$ ]

Na Grafech 17–18 můžeme vidět indexy stárnutí fázového úhlu, které nám podrobněji ukazují, jak se hodnoty fázového úhlu syntetických poživ zvyšují a standardního pojiva klesají vlivem stárnutí. Zde byly indexy stárnutí vypočítané jako rozdíl fázového úhlu zestárlého a nezestárlého pojiva.

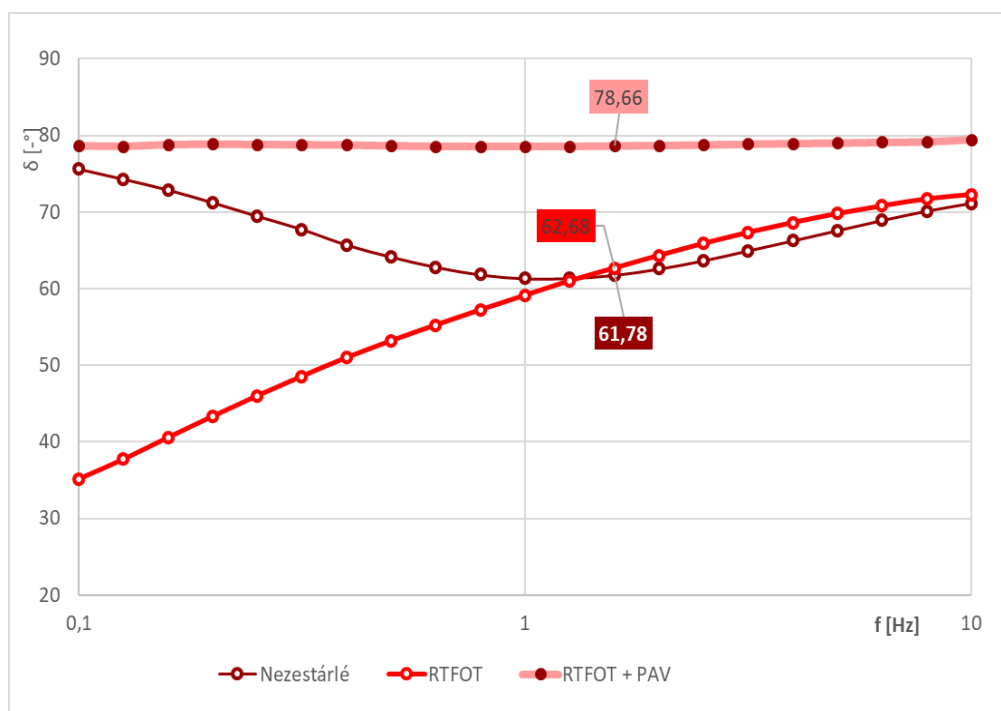


Graf 19: Isotermie fázového úhlu ( $\delta$ ) při teplotě 60 °C – standardní po-

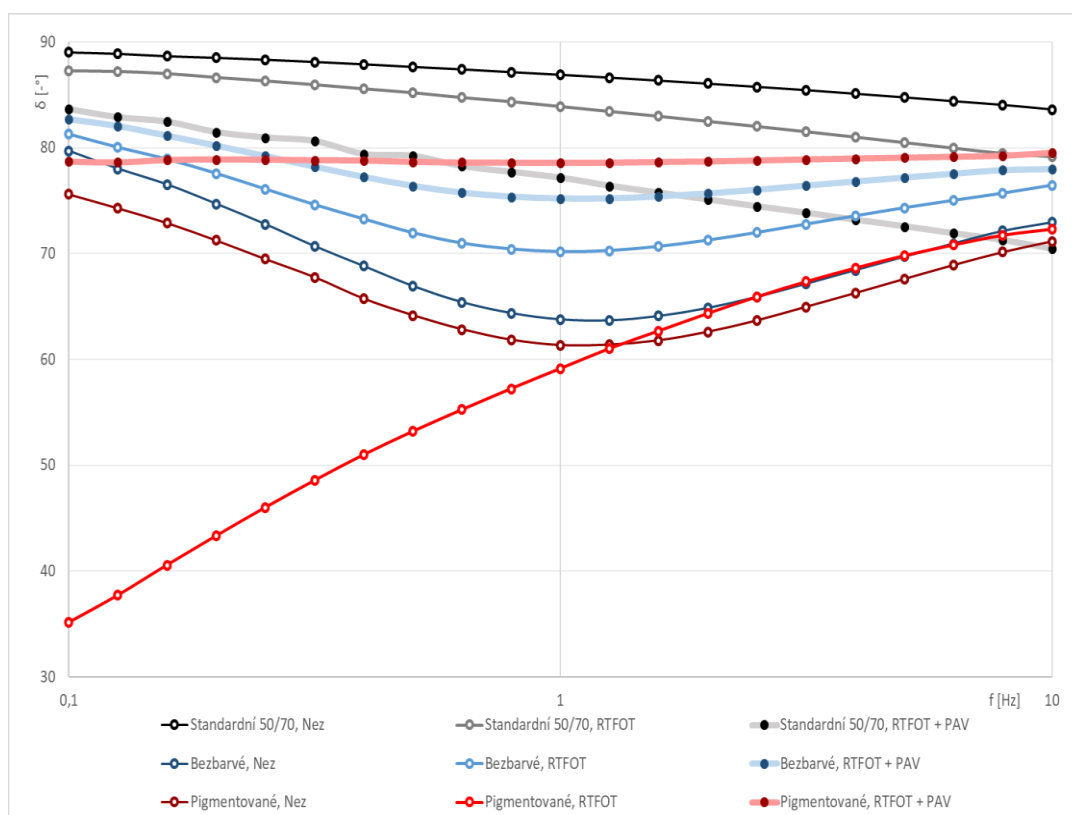


Graf 20: Isotermie fázového úhlu ( $\delta$ ) při teplotě 60 °C – bezbarvého pojiva





Graf 21: Isotermie fázového úhlu ( $\delta$ ) při teplotě 60 °C – pigmentovaná pojiva

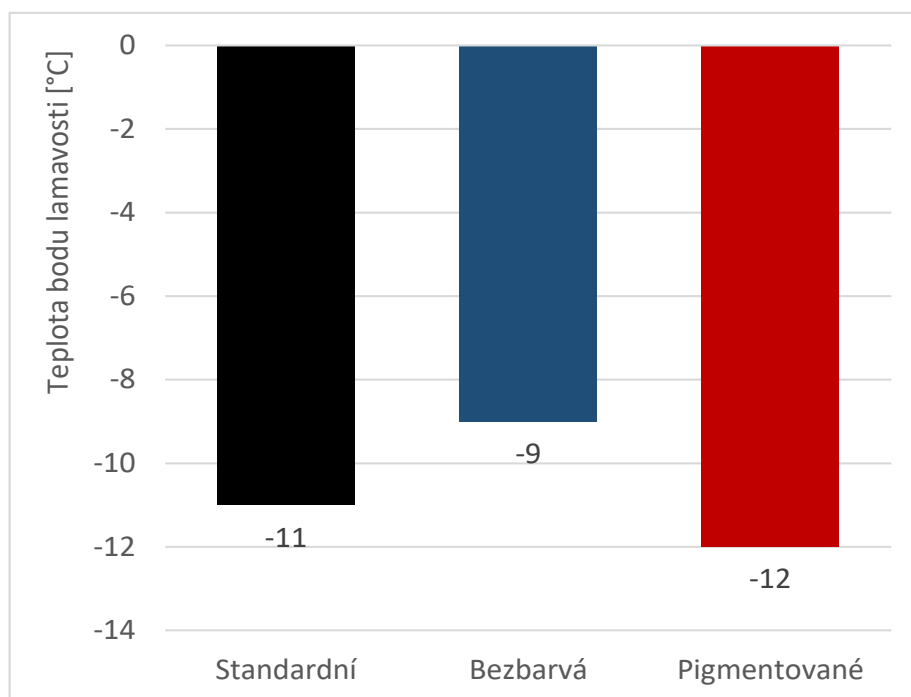


Graf 22: Isotermie fázového úhlu ( $\delta$ ) při teplotě 60 °C všech pojiv

Na grafech 19–22 můžeme pozorovat isotermy fázového úhlu, kdy s rostoucí frekvencí obvykle fázový úhel klesá, jak je to u standardního pojiva. Nižší fázové úhly mají syntetická pojiva, takže vykazují vyšší odolnost vůči deformaci.

#### 6.4 Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse

Zkušební metoda ke Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse byla provedena dle platné normy ČSN EN 12593 a byla stručně popsána v bodu 4.4. Tato zkouška byla provedena na nezestárých asfaltových pojivech a výsledky jsou vyneseny v grafu 23.



*Graf 23: Teplota bodu lámavosti podle Fraasse*

V normě ČSN 65 7204 je pro silniční asfalty 50/70 nejvyšší požadovaná hodnota bodu lámavosti – 8 °C. Tuto hodnotu všechna pojiva splnila. Nejvyšší (nejhorší) hodnotu – 9 °C dosáhlo bezbarvé pojivo, oproti tomu nejnižší (nejlepší) hodnotu – 12 °C dosáhlo pigmentované pojivo.

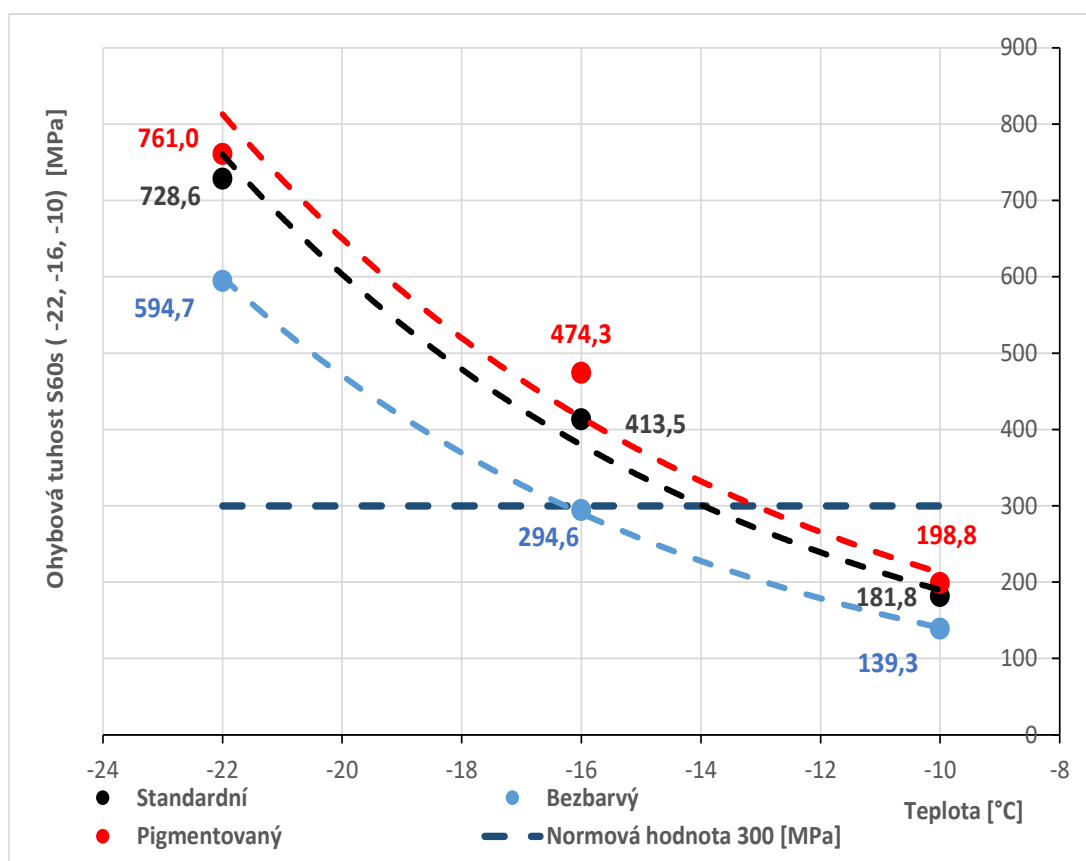
#### 6.5 Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru BBR

Zkušební metoda ke stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru BBR byla provedena dle platné normy ČSN EN 14771 a byla stručně popsána v bodu 4.7.

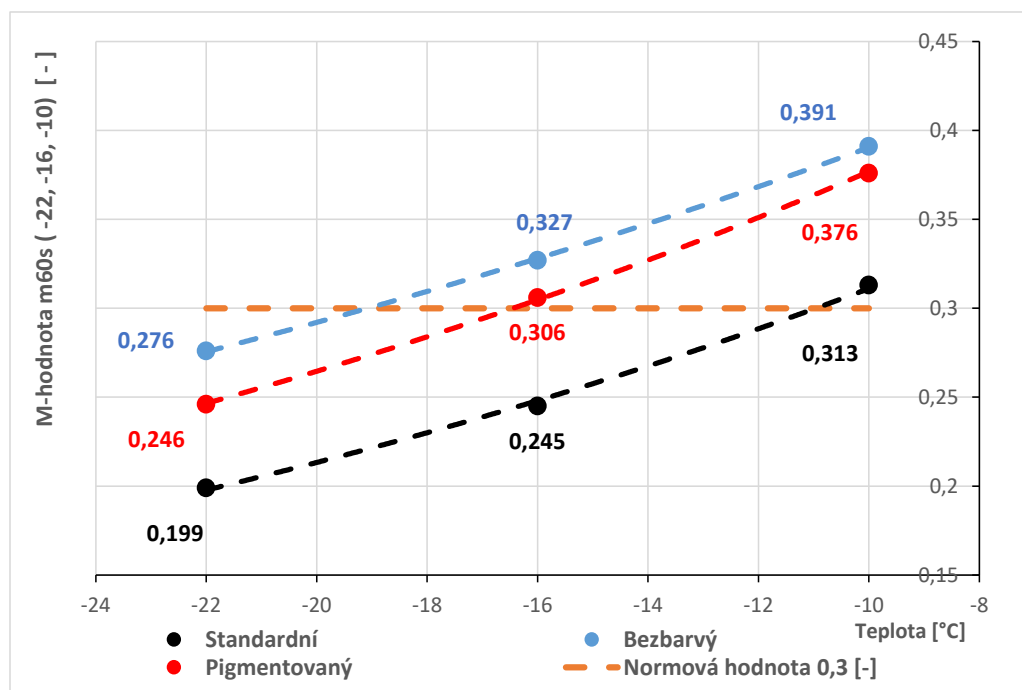
Pro stanovení modulu tuhosti byl použit průhybový trámečkový reometr BBR (Bending Beam Rheometer). Cílem zkoušky bylo stanovit kritickou teplotu, při které dojde k porušení asfaltového trámečku. Měření probíhalo při teplotách (-10, -16, -22) °C, protože se očekávalo, že kritická teplota bude ležet v tomto rozmezí teplot.

Kritická teplota je stanovena z hodnot modulu tuhosti, který má při 60 s ( $S_{m60s} = 300$  MPa) a z m hodnot při 60 s ( $m_{60s} = 0,3$ ). Jako výsledná hodnota se bere vyšší (méně příznivá) hodnota z těchto dvou teplot.

Čím je hodnota modulu tuhosti vyšší, tím se stává citlivější na vznik mrazových trhlin. V grafu 24 jsou zaneseny jednotlivé hodnoty ohybové tuhosti  $S_{m60}$  a normová hodnota 300 MPa. Můžeme pozorovat, že s klesající teplotou modul tuhosti exponenciálně roste u všech pojiv. Maximální hodnota modulu tuhosti je  $S_{m60}$  je 761,0 MPa pro pojivo pigmentové a minimální pro pojivo bezbarvé 594,7 MPa při teplotě -22 °C.

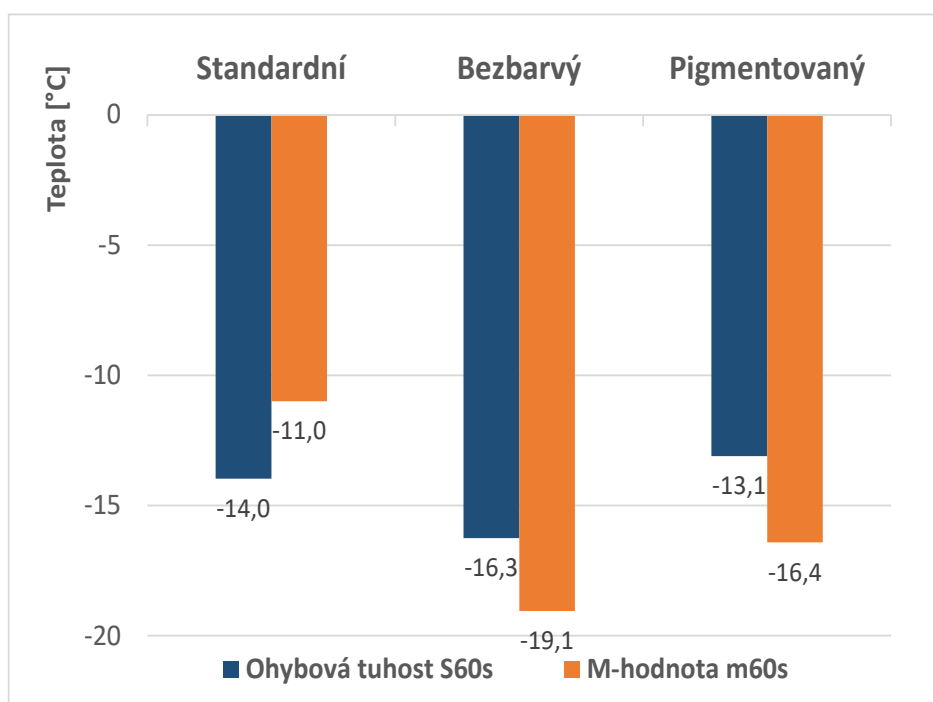


Graf 24: Stanovení kritické teploty při modulu tuhosti  $S_{60s} = 300$  MPa



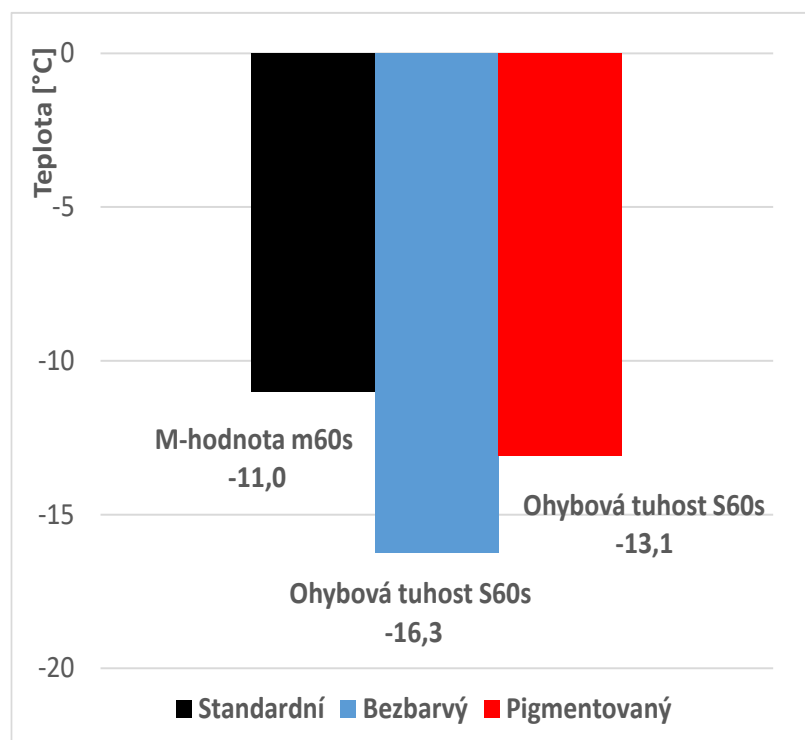
Graf 26: Stanovení kritické teploty při m-hodnotě m60s = 0,3 [-]

Modul tuhosti s klesající teplotou roste na rozdíl od m-hodnoty, která s klesající teplotou klesá exponenciálně. Čím je m-hodnota vyšší, tím je pojivo schopné rychleji se dotvarovat, odbourat napětí a tím má vyšší odolnost vůči vzniku mrazových trhlin. Nejvyšší m-hodnota je 0,391 [-] u bezbarvého pojiva a nejnižší m-hodnota 0,313 [-] u standardního pojiva při nejvyšší zkoušené teplotě – 10 °C.



Graf 25: Kritické teploty ze S60s a m60s

Graf 26 zobrazuje výsledky kritických teplot při dosažení  $S_{60s} = 300 \text{ MPa}$  a  $m_{60s} = 0,3$ . Nejnižší (nejlepší) kritické teploty z m-hodnoty dosáhlo bezbarvé pojivo  $m_{60s} = -19,1 \text{ °C}$  a z modulu tuhosti  $S_{60s} = -16,3 \text{ °C}$ . Nejvyšší (nejhorší) kritické teploty z m-hodnoty dosáhlo pojivo standardní  $m_{60s} = -11,0 \text{ °C}$  a z modulu tuhosti pojivo pigmentové  $S_{60s} = -13,1 \text{ °C}$ .



*Graf 27: Výsledné kritické teploty*

Z grafu 27 si můžeme udělat závěr, že nejnižší (nejlepší) výslednou kritickou teplotu má bezbarvé pojivo s hodnotou  $S_{60s} = -16,3 \text{ °C}$ . Nejvyšší (nejhorší) výsledné kritické teploty má standardní pojivo s  $m_{60s} = -11,0 \text{ °C}$ .

Z výsledků můžeme usoudit, že nejlepší odolnost proti vzniku křehkého lomu má bezbarvé pojivo.

## 7. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo porovnat vlastnosti tří asfaltových pojiv. Konkrétně se jednalo o standardní silniční asfalt třídy 50/70, bezbarvé syntetické pojivo třídy 50/70 a syntetické pigmentované pojivo třídy 50/70. K porovnání byly použité výsledky ze zkoušek penetrace jehlou, bodu měknutí, DSR, bod lámavosti a BBR. V laboratoři se provedly tyto zkoušky ve třech stupních zestárnutí pojiv (pojiva nezestárlá, zestárlá metodou RTFOT a metodami RTFOT+PAV).

Z výsledků zkoušky penetrace jehlou je zřejmé, že všechna tři pojiva dosahovala mírně nižší hodnoty penetrace jehlou, než požaduje norma ČSN 65 7204 pro silniční asfalty třídy 50/70. Syntetická pojiva vykazují nižší změny hodnot penetrace vlivem stárnutí. Obecně lze říci, že syntetická pojiva téměř nestárnou. Při porovnání se standardním pojivem, které má po obou metodách stárnutí nejnižší hodnoty penetrace, to znamená že je tvrdší, křehčí, hrozí vyšší riziko vzniku trhlin.

Ze stanovení bodu měknutí bylo zjištěno, že opět syntetická pojiva téměř nestárnou, a hlavně vykazují neobvyklé chování, protože stárnutím se hodnota bodu měknutí snižuje. U standardního pojiva se stárnutím hodnoty bodu měknutí zvyšují, tím se zvyšuje jeho odolnost proti tvorbě trvalých deformací (například vyjeté koleje), ale zase hůř odolává vzniku trhlin.

První funkční zkouškou bylo stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu pomocí dynamického smykového reometru. Cílem zkoušky bylo zjistit viskoelastické chování pojiv. Z výsledku vyplývá, že hodnoty komplexního smykového modulu v nezestárlém stavu mají pojiva srovnatelná. Vlivem stárnutí se hodnoty komplexního smykového modulu u standardního pojiva zvýšily, to znamená že se stalo tužším. Syntetická pojiva vykazují nízké hodnoty fázového úhlu a je patrné, že jsou pružnější, mají snahu navracet se do původního stavu, mají vyšší odolnost vůči deformacím.

Nejnižší (nejlepší) teplotu bodu lámavosti podle Fraasse mělo pigmentové pojivo. Z poslední funkční zkoušky BBR byly zjištěny výsledné dolní kritické teploty srovnávaných pojiv zestárlých metodami RTFOT+PAV, které má nejnižší (nejlepší) bezbarvé pojivo, to znamená, že nejlépe odolá vzniku křehkého lomu.



Závěrem lze říci, že syntetická pojiva jsou odolnější vůči vzniku mrazových trhlin, jsou pružnější, nejsou tak křehká jako standardní pojivo. A hlavně téměř nepodléhají stárnutí.

Výsledné hodnoty zkoušek srovnávaných poživ jsou souhrnně zobrazeny v tabulce 5.

Výsledky zkoušek mohly být mírně ovlivněny přítomností zbytků plastových pytlů v bezbarvém a pigmentovaném pojivu, které byly pozorovány při laboratorní přípravě zkušebních vzorků za horka. Lze ovšem předpokládat, že při výrobě asfaltové směsi na obalovně bude tento problém eliminován intenzivním mícháním složek směsi míchacím zařízením obalovny.

Asfaltová pojiva	Stupeň stárnutí	Zkoušky					
		Penetrace jehlou	Bod měknutí	Bod lámavosti	DSR		BBR - kritická teplota [°C]
		[0,1 mm]	[°C]	[°C]	G* [kPa]	δ [-°]	
Standardní	Nezestárlá	46,2	49,6	-11	2,31	86,34	S60s -
	RTFOT	28,0	55,3	-	5,58	82,96	-
	RTFOT + PAV	15,4	63,9	-	22,53	75,74	-14,0 -11,0
Bezbarvé	Nezestárlá	49,1	53,2	-9	2,25	64,09	-
	RTFOT	41,7	52,8	-	2,34	70,66	-
	RTFOT + PAV	39,5	51,8	-	2,25	75,38	-16,3 -19,1
Pigmentové	Nezestárlá	39,8	55,5	-12	3,67	61,78	-
	RTFOT	34,6	53,2	-	4,33	62,68	-
	RTFOT + PAV	31,2	52,5	-	3,25	78,66	-13,1 -16,4

Tabulka 5: Výsledky zkoušených poživ

## 8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ

- [1] VARAUS, Michal. *Pozemní komunikace II. Asfaltová pojiva*. Brno, 2005 Copyright ©
- [2] VYMAZAL, Tomáš. KUDRNA, Jan. *Stavební látky druhy asfaltů. Asfalty a dehty. Složení asfaltů. Vlastnosti asfaltů*. [online]. Copyright © DocPlayer.cz. Dostupné z: <https://docplayer.cz/16911628-Stavebni-latky-druhy-asfaltu-asfalty-asfalty-a-dehty-slozeni-asfaltu-vlastnosti-asfaltu.html>
- [3] PORTO, Michele, Paolino CAPUTO, Valeria LOISE, Shahin ESKANDARSEFAT, Bagdat TELTAYEV a Cesare OLIVIERO ROSSI. *Bitumen and Bitumen Modification: A Review on Latest Advances. Applied Sciences*. www.mdpi.com [online]. DOI: 10.3390/app9040742. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2076-3417/9/4/742>
- [5] MUSIL, Vladimír. *Relaxace smykového napětí asfaltových pojiv v DSR*. Brno, 2015, 72 stran. Diplomová práce. VUT Brno
- [6] *Stav silnic*, www.wikiwand.com [online]. Dostupné z: [https://www.wikiwand.com/cs/Vyjet%C3%A9\\_koleje](https://www.wikiwand.com/cs/Vyjet%C3%A9_koleje)
- [7] *Černé slzy matky Země*. www.czech-press.cz. Koktejl [online]. Dostupné z: [http://www.czechpress.cz/index.php?option=com\\_content&view=article&id=479%3Aerne-slzymatky-zem&Itemid=4](http://www.czechpress.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=479%3Aerne-slzymatky-zem&Itemid=4)
- [8] *Článek po hladině pitch lake*. www.national-geographic.cz [online]. Dostupné z: <https://www.national-geographic.cz/clanky/po-hladine-jezera-pitch-lake-se-muzete-projit-opravdu-neni-v-nem-totiz-voda-ale-asfalt.html>
- [9] *Oxidace asfaltů*. petroleum.cz, Úvodní stránka [online]. Dostupné z: <http://petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-42.aspx>
- [10] *Zpracování ropy*. ropoweb.xf.cz [online]. Copyright © Dostupné z: <http://ropoweb.xf.cz/postup.html>
- [11] *Úvod*, www.energy-oil-gas.com [online]. Dostupné <http://energy-oil-gas.com/profiles/total-lindsey-oil-refinery/>

- [12] ČSN EN 14023 Asfalty a asfaltová pojiva – Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty. 2010.
- [13] *Ropa a zemní plyn*. slideplayer.cz [online]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/1982335/>
- [14] KAUN, Miroslav, František LUXEMBURK a České vysoké učení technické v Praze. *Pozemní komunikace 30*. Praha: ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02486-5. Dostupné také z: <https://kramerus.techlib.cz/kramerus-web-client/uuid/uuid:9d782ae8-6d88-4920-bf86-243234b676f7>
- [15] *Rozdělení a charakteristika polymerů*. [online]. Copyright © Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/04.html>
- [16] PARAMO A.S. *Katalog silničních pojiv: Doplněný technickou zprávou o funkčních vlastnostech*. 2009. Dostupné z: [http://www.stavebnivyrobekroku.cz/db\\_binary\\_file/other/365](http://www.stavebnivyrobekroku.cz/db_binary_file/other/365)
- [17] *Asfalty a asfaltové výrobky*. petroleum.cz [online]. Copyright © Dostupné z: <http://petroleum.cz/vyroby/asfalty.aspx>
- [18] JIŘIČKOVÁ, Milena. *Materiálové inženýrství I*. Praha: České vysoké učení technické, 2011.s. 202. ISBN 978-80-01-04932-7. Dostupné také z: <https://kramerus.techlib.cz/kramerusweb-client/uuid/uuid:1ab27ab3-47b3-11e4-a587-001b63bd97ba>
- [19] *Snížení tepelné zátěže měst*. [online]. Copyright © Dostupné z: <https://tvstav.cz/clanek/4573-snizeni-tepelne-zateze-mest-reseni-lezi-na-silnici>
- [20] *S toalem barevně*. silnice-zeleznice.cz [online]. Copyright © Dostupné z: <https://silnice-zeleznice.cz/silnicni-infrastruktura/s-toalem-barevne-374>
- [21] *TOTAL vyrábí v Kouřimi silniční a průmyslové asfalty nejvyšší kvality*. press.aspen.pr [online]. Copyright © Dostupné z: <http://press.aspen.pr/total/tiskove-zpravy/total-vyrabi-v-kourimi-silnicni-a-prumyslove-asfalty-nejvyssi-kvality/>
- [22] *KROMATIS® LIANT CLAIR*, total.link.be [online]. Dostupné z: [http://total.link.be/be/B2B\\_BTM\\_FR/KROMATIS\\_ROUTE\\_FR.pdf](http://total.link.be/be/B2B_BTM_FR/KROMATIS_ROUTE_FR.pdf)

- [23] *Total Polsko dodává bezbarvé syntetické pojivo Kromatis pro revitalizaci parku Solidarity ve Rzeszowě*total. prowly.com, [online]. Dostupné z: <https://total.prowly.com/100995-total-polska-dostarcza-bezbarwne-lepisczce-syntetyczne-kromatis-na-potrzeby-rewitalizacji-parku-solidarnosci-w-rzeszowie>
- [24] ČSN EN 1426: *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou*. ÚNMZ, 2015.
- [25] ČSN EN 1427: *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda Kroužek a kulička*. ÚNMZ, 2015
- [26] ČSN EN 14770: *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR)*. ÚNMZ, 2012
- [27] VALENTIN, Jan. ČVUT, Fakulta stavební, Katedra silničních staveb. *Užitné vlastnosti a reologie asfaltových pojiv a směsí: charakteristiky, nové zkušební metody, vývojové trendy*. Praha: INPRESS a.s., 2003, 224 s
- [28] MILÁČKOVÁ, Kristýna. ČVUT, Fakulta stavební, Katedra silničních staveb. *Porovnání metod využitelných pro stanovení dynamické viskozity asfaltových pojiv*, 2011/2012. Dostupné také z: <https://www.fsv.cvut.cz/svoc/2012/vysledky/d3.pdf?fbclid=IwAR3scWZeTsCoc3Nvx9zECIxxWXxycS0eJBNjeyK-NBJ1lOBStFZZl1TfvGhk>
- [29] ČSN EN 12593. *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse*. ÚNMZ, 2015
- [30] ČSN EN 12607-1. *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Část 1: Metoda RTFOT*. ÚNMZ, 2015
- [31] ČSN EN 14769. *Asfalty a asfaltová pojiva – Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV)*. ÚNMZ, 2012
- [32] ČSN EN 14771. *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR)*. ÚNMZ, 2012
- [33] DOSTÁL, Filip, *Vliv druhu a dávky polymeru na vlastnosti modifikovaných pojiv*, diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací, 2020. 162 s

## 9. SEZNAMY

### 9.1 SEZNAM OBRAZKŮ

Obrázek 1: Vzorek standardního silničního asfaltového pojiva 50/70 .....	10
Obrázek 2: Visko-elastické vlastnosti asfaltu [5] .....	11
Obrázek 3: Vyjeté koleje v autobusové zastávce [6] .....	11
Obrázek 4: Pitch Lake, Trinidad [8] .....	12
Obrázek 5: Ukázka ropné rafinerie TOTAL ČESKÁ REPUBLIKA s.r.o. [11] .....	13
Obrázek 6: Rozdělení asfaltových pojiv dle ČSN EN 14023 [12] .....	13
Obrázek 7: Základní dělení asfaltů .....	14
Obrázek 8: Grafické znázornění frakční destilace [13] .....	15
Obrázek 9: Základní rozdělení polymerů [15] .....	16
Obrázek 10: Plast (vlevo), elastomer (vpravo) [15] .....	17
Obrázek 11: Odstín žluté [19] .....	18
Obrázek 12: Odstín zelené [19] .....	18
Obrázek 13: Odstín červené [22] .....	18
Obrázek 14: Příklady použití pigmentů [23] .....	19
Obrázek 15: Barevné varianty pigmentů [20] .....	20
Obrázek 16: Příklad penetrometru [24] .....	22
Obrázek 17: Zkušební kelímky s pojivem .....	23
Obrázek 18: Temperování zkušebních kelímků s pojivem .....	23
Obrázek 19: Penetrometr se zkušebním vzorkem .....	24
Obrázek 20: Sestava dvou kroužků s držákem (A) a základní deskou (B) [25] .....	25
Obrázek 21: Kroužky se zahřátým pojivem na odlévací destičce .....	25
Obrázek 22: Měření metodou kroužek a kulička .....	26
Obrázek 23: Formy ze silikonu s asfaltovým pojivem .....	27
Obrázek 24: Princip dynamického smykového reometru (DSR) [27] .....	28
Obrázek 25: Složky komplexního modulu [28] .....	28
Obrázek 26: Dynamický smykový reometr Kinexus .....	29
Obrázek 27: Suchý led .....	30
Obrázek 28: Zkušební plíšky .....	30
Obrázek 29: Porušení vzorku .....	31



Obrázek 30: Skleněná nádobka s bezbarvým pojivem .....	32
Obrázek 31: Skleněná nádobka s pigmentovým pojivem.....	32
Obrázek 32: Skleněná nádobka se standardním pojivem .....	32
Obrázek 33 Příklad zkušebního zařízení PAV [31] .....	33
Obrázek 34: Misky s nalitým pojivem .....	34
Obrázek 35: Držák s miskami .....	34
Obrázek 36 Schématický nákres BBR [32] .....	35
Obrázek 37: Asfaltové pojivo ve formě pro měření BBR .....	36
Obrázek 38: Průhybový trámečkový reometr (BBR).....	37
Obrázek 39: Způsob odvození m-hodnoty [33] .....	38

## 9.2 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Maximální rozdíl platných stanovení .....	24
Tabulka 2: Výchozí materiály .....	39
Tabulka 3: Výsledky zkoušky penetrace jehlou .....	40
Tabulka 4: Výsledky zkoušky Kroužek a kulička .....	42
Tabulka 5: Výsledky zkoušených poživ .....	60

### 9.3 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Srovnání výsledků penetrace jehlou podle délky vlivu stárnutí .....	40
Graf 2: Srovnání výsledků penetrace jehlou podle druhu pojiva .....	41
Graf 3: Zbýlá penetrace asfaltových pojiv v procentech .....	42
Graf 4: Srovnání výsledků bodu měknutí podle délky vlivu stárnutí.....	43
Graf 5: Srovnání výsledků bodu měknutí podle druhu pojiva .....	43
Graf 6: Změna bodu měknutí [°C] .....	44
Graf 7: Komplexní smykový modul $G^*$ při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz podle délky vlivu stárnutí.....	45
Graf 8: Komplexní smykový modul $G^*$ při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz podle druhu pojiva.....	45
Graf 9: Index stárnutí komplexní modul ve smyku $G^*$ (RTFOT/ nezestárlé) [kPa] .....	46
Graf 10: Index stárnutí komplexní modul ve smyku $G^*$ (RTFOT + PAV) / nezestárlé [kPa] ..	47
Graf 11: Isotermie komplexního modulu ve smyku ( $G^*$ ) při teplotě 60 °C – standardní pojivo .....	47
Graf 12: Isotermie komplexního modulu ve smyku ( $G^*$ ) při teplotě 60 °C – bezbarvého pojiva .....	48
Graf 13: Isotermie komplexního modulu ve smyku ( $G^*$ ) při teplotě 60 °C – pigmentované pojivo .....	48
Graf 14: Isotermie komplexního modulu ve smyku ( $G^*$ ) při teplotě 60 °C všech pojiv .....	49
Graf 15: Fázový úhel ( $\delta$ ) při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz podle druhu pojiva .....	50
Graf 16: Fázový úhel ( $\delta$ ) při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz podle délky vlivu stárnutí ..	50
Graf 17: Index stárnutí fázového úhlu $\delta$ (RTFOT – nezestárlé) [-°].....	51
Graf 18: Index stárnutí fázového úhlu $\delta$ (RTFOT + PAV) - nezestárlé [-°] .....	51
Graf 19: Isotermie fázového úhlu ( $\delta$ ) při teplotě 60 °C – standardní pojivo .....	52
Graf 20: Isotermie fázového úhlu ( $\delta$ ) při teplotě 60 °C – bezbarvého pojiva.....	52
Graf 21: Isotermie fázového úhlu ( $\delta$ ) při teplotě 60 °C – pigmentovaná pojiva.....	53
Graf 22: Isotermie fázového úhlu ( $\delta$ ) při teplotě 60 °C všech pojiv.....	53
Graf 23: Teplota bodu lámavosti podle Fraasse .....	54
Graf 24: Stanovení kritické teploty při modulu tuhosti $S_{60s} = 300$ MPa .....	55
Graf 25: Kritické teploty ze $S_{60s}$ a $m_{60s}$ .....	56
Graf 26: Stanovení kritické teploty při m-hodnotě $m_{60s} = 0,3$ [-] .....	56

Graf 27: Výsledné kritické teploty .....	57
--	----